

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΣΤΡΟΒΙΛΟΎΠΕΡΠΛΗΡΟΥΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ DIESEL ΤΡΕΝΟΥ***



**ΓΑΣΤΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**Επιβλέπων Καθηγητής κ. Νικόλαος Βλάχος**

**Τριμελής Επιτροπή κ. Νικόλαος Βλάχος, κ. Αναστάσιος Σταματέλλος, κ. Αναστάσιος Σταμάτης**

**Βόλος – Σεπτέμβριος 2003**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 2474/1  
Ημερ. Εισ.: 18-02-2004  
Δωρεά:  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΜΜΒ  
2003  
ΓΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070528

*Αφιερώνεται στους γονείς μου  
Παναγιώτη και Αθηνά*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πριν ξεκινήσω την ανάπτυξη της Διπλωματικής Εργασίας μου, θεωρώ υποχρέωση, τιμή και χαρά μου να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους, που ο καθένας με τον δικό του τρόπο με βοήθησε να διεκπεραιώσω την εργασία αυτή, αλλά και σηματοδότησαν την πορεία μου σαν φοιτητή και σαν άνθρωπο. Τους ευχαριστώ εκ των προτέρων.

Ευχαριστώ τους καθηγητές μου Νικόλαο Βλάχο, επιβλέποντα της Διπλωματικής μου, Αναστάσιο Σταμάτη συνεπιβλέποντα της Διπλωματικής μου και Αναστάσιο Σταματέλλο, μέλος της εξεταστικής επιτροπής, που με βοήθησαν να εκπονήσω αυτή την Εργασία, πίστεψαν στις δυνατότητές μου και είχαν πάντα την πόρτα τους ανοιχτή στον Βασίλειο Γάστη.

Ευχαριστώ τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του Εργαστηρίου Ρευστοδυναμικής και Στροβιλομηχανών Χρήστο Δριτσέλη, Γεώργιο Ζήκο, Σωτήρη Κακαράτζα και Τέλη Χουλιάρα, τους διδακτορικούς Σπύρο Παπασπύρου από το Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και τους Γεώργιο Κωνσταντά και Γεώργιο Στρατάκη από το Εργαστήριο Θερμοδυναμικής και Θερμικών Μηχανών, οι οποίοι με βοήθησαν και έλυσαν όποιες απορίες είχα, χωρίς να μου έχουν καμία υποχρέωση.

Ευχαριστώ τους φίλους μου Κωνσταντίνο Γαλή, Σωτήρη Ζεϊμπέκη, Γεώργιο Λυσίτσα, Λάζαρο Πάτκα, Δημήτριο Σαρανταρίδη, Κωνσταντίνο Σιούμη και Αθανάσιο Σισμανίδη, με τους οποίους έζησα αυτά τα πέντε χρόνια στο Βόλο, για όλες τις στιγμές που μου χάρισαν, την υποστήριξη και την κατανόηση. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον αδερφικό μου φίλο Τριαντάφυλλο Καλλιαρόπουλο και την Σοφία Παλογιαννίδου, που σαν αυθεντικοί φίλοι έδειξαν υπομονή, με βοήθησαν σε δύσκολες στιγμές και μου πρόσφεραν ό,τι καλύτερο από τον εαυτό τους.

Ευχαριστώ, τους γονείς μου Παναγιώτη και Αθηνά Γάστη για την ανατροφή που μου έδωσαν, την ευκαιρία να σπουδάσω, την στήριξη που μου πρόσφεραν όλα αυτά τα χρόνια και την υπομονή που έδειξαν αυτά τα πέντε χρόνια. Επίσης, να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Δημήτριο Γάστη και όλο το υπόλοιπο οικογενειακό περιβάλλον μου, το οποίο απλόχερα στάθηκε δίπλα μου και στήριξε τις ελπίδες του σε εμένα.

Τέλος, ευχαριστώ όλους αυτούς γνωστούς και αγνώστους που με μια τους κουβέντα, συνειδητά ή ασυνείδητα, με οδήγησαν και αυτοί εδώ που βρίσκομαι.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΥΠΟΜΝΗΜΑ .....</b>	<b>7</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>9</b>
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	9
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	9
<b>2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>11</b>
2.1 Ο ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ DIESEL.....	11
2.2 Η ΥΠΕΡΠΛΗΡΩΣΗ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ DIESEL .....	14
2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥΠΕΡΠΛΗΡΩΤΩΝ .....	16
2.3.1 Τύποι Στροβιλοϋπερπληρωτών.....	24
2.3.1.1 Υπερπληρωτές με Βαλβίδες Εκτόνωσης Καυσασερίων (Waste-Gating Turbochargers).....	25
2.3.1.2 Υπερπληρωτές Μεταβλητής Γεωμετρίας (Variable Geometry Turbochargers) .....	26
2.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	29
<b>3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ .....</b>	<b>31</b>
3.1 ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ.....	31
3.2 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ .....	31
3.2.1 Μεταβλητές Απόφασης .....	32
3.2.2 Παράμετροι .....	32
3.2.3 Εξαρτημένες Μεταβλητές.....	33
3.3 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥΠΕΡΠΛΗΡΟΥΜΕΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ DIESEL .....	33
3.3.1 Ο Θάλαμος Καύσης.....	33
3.3.2 Ο Στροβιλοσυμπιεστής.....	34
3.3.3 Ο Ψύκτης (Intercooler) .....	34
<b>4. ΑΡΙΘΜΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....</b>	<b>36</b>
4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ .....	36
4.1.1 Η Επαναληπτική Μέθοδος Newton-Raphson .....	39
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ.....	41
4.2.1 Τα Κύρια Σημεία του Κώδικα.....	41
4.2.2 Η Υπορουτίνα TEST .....	43
<b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....</b>	<b>46</b>
5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	46
5.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	49
5.2.1 Εκτέλεση SIMULATION1 .....	49
5.2.2 Εκτέλεση SIMULATION2.....	50
5.2.3 Εκτέλεση SIMULATION3.....	50
5.2.4 Εκτέλεση SIMULATION4.....	50
5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	50
5.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	51
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>53</b>
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	53
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	54
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>56</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – ΠΙΝΑΚΕΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>57</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>64</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....</b>	<b>83</b>

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....</b>	<b>126</b>
<b>ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ.....</b>	<b>129</b>

# ΥΠΟΜΝΗΜΑ

## Αγγλικοί Χαρακτήρες

$C_p$	Ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση, $kJ/kg\ K$
$C_v$	Ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο, $kJ/kg\ K$
$\bar{h}$	Ενθαλπία., $kJ/kg$
$\bar{h}_c$	Ενθαλπία ψυχρού μέσου, $kJ/kg$
$\bar{h}_f$	Ενθαλπία σχηματισμού, $kJ/kmol$
$k$	Λόγος ειδικών θερμοτήτων, $C_p/C_u$
$\overline{LHV}$	Κατώτερη θερμογόνος δύναμη καυσίμου, $kJ/kmol$ καυσίμου
$\dot{m}$	Παροχή μάζας, $kg/s$
$M$	Μοριακό βάρος
$\eta$	Απόδοση
$\dot{n}$	Γραμμομοριακή παροχή, $kmol/s$
$P$	Πίεση, $bar$
$q$	Μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα μάζας, $kJ/kg$
$\dot{Q}$	Ρυθμός μεταφοράς θερμότητας, $kW$
$r$	Λόγος συμπίεσης
$r_c$	Λόγος αποκοπής
$R$	Παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων, $8.314\ J/molK$
$s$	Εντροπία, $kJ/kg\ K$
$T$	Θερμοκρασία, $K$
$u$	Ειδική εσωτερική ενέργεια, $kJ/kg$
$v$	Ειδικός όγκος, $m^3/kg$
$V$	Ολικός όγκος, $m^3$
$w$	Έργο ανά μονάδα μάζας, $kJ/kg$



$\dot{W}$	Ισχύς, $kW$
$W_{in}$	Έργο εισόδου, $kJ$
$W_{out}$	Έργο εξόδου, $kJ$
$x$	Σύσταση

### **Ελληνικοί Χαρακτήρες**

$\varepsilon$	Αποτελεσματικότητα
$\overline{\lambda}$	Γραμμομοριακός λόγος καυσίμου-αέρα

### **Δείκτες**

$a$	Αέρας
$c$ ή $com$	Συμπιεστής
$cn$	Όγκος ελέγχου
$f$	Καύσιμο
$in$	Είσοδος
$is$	Ισεντροπικός
$t$ ή $turb$	Στρόβιλος
$th$	Θερμικός
$out$	Έξοδος
$p$	Καυσαέρια

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο και Στόχος της Διπλωματικής Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας με τίτλο «Ανάπτυξη Μοντέλου Προσομοίωσης Στροβιλοϋπερπληρούμενης Μηχανής Diesel Τρένου» είναι η θερμοδυναμική μελέτη ενός συστήματος στροβιλοϋπερπληρωτή που συναρμόζεται σε μία μηχανή ανάφλεξης με συμπίεση. Στόχος της Διπλωματικής ήταν να αναπτυχθεί το θερμοδυναμικό μοντέλο που περιγράφει το σύστημα του στροβιλοϋπερπληρούμενου κινητήρα Diesel καταστρώνοντας τις εξισώσεις ισοζυγίων ενέργειας και μάζας, καθώς και όλες τις απαραίτητες θερμοδυναμικές εξισώσεις. Να επιλυθεί αυτό αριθμητικά και να κατασκευαστεί ένας αριθμητικός κώδικας, με την βοήθεια του οποίου θα μπορεί να γίνει παραμετρική μελέτη του συνολικού συστήματος. Με την βοήθεια του αριθμητικού κώδικα θα μπορέσουμε να υπολογίσουμε όλες τις θερμοδυναμικές παραμέτρους του συστήματος, όπως πιέσεις, θερμοκρασίες, ενθαλπίες και εντροπίες, αλλά και παροχές, συστάσεις καυσασερίων και κυρίως τους λόγους συμπίεσης και εκτόνωσης του συμπιεστή και του στροβίλου, αντίστοιχα, καθώς και τις αποδόσεις αυτών.

## 1.2 Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε στον αναγνώστη τη διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2 γίνεται η περιγραφή του φυσικού προβλήματος, όπου παρουσιάζεται ο θερμοδυναμικός κύκλος Diesel και η ανάγκη των μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση για υπερπλήρωση, αναδεικνύοντας έτσι τόσο την σπουδαιότητα, όσο και τη χρησιμότητα των στροβιλοϋπερπληρωτών. Έχοντας αναγνωρίσει την σημαντικότητα των τελευταίων, αναλύονται τα χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων που απαρτίζουν έναν στροβιλοϋπερπληρωτή και αναπτύσσεται η μεθοδολογία μελέτης του προβλήματος.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 καθορίζονται οι υποθέσεις του προβλήματος, αναγνωρίζονται οι παράμετροι και οι μεταβλητές αυτού και γίνεται η μαθηματική

περιγραφή του θερμοδυναμικού στροβιλοϋπερπληρούμενου κύκλου Diesel, όπου και καταστρώνονται οι εξισώσεις ισοζυγίου ενέργειας και μάζας για τον κινητήρα και τον στροβιλοϋπερπληρωτή, καθώς και όλες οι άλλες απαραίτητες θερμοδυναμικές σχέσεις.

Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αριθμητική επίλυση όλων των παραπάνω εξισώσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια διαφόρων μαθηματικών τεχνικών και της αριθμητικής ανάλυσης. Αφού γίνει η αριθμητικοποίηση του μαθηματικού μοντέλου, περιγράφεται ο αριθμητικός κώδικας Fortran που αναπτύχθηκε για την επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, ο οποίος κατασκευάστηκε με βάση τις μεθόδους που αναλύθηκαν στην αριθμητικοποίηση του μοντέλου.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η περιγραφή της παραμετρικής μελέτης και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκτέλεση του αριθμητικού κώδικα, ενώ στο Κεφάλαιο 6 ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι προτάσεις σχετικά με το συγκεκριμένο μοντέλο.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο κύκλος Diesel και τα γενικά χαρακτηριστικά που τον διέπουν, αλλά και αναλύεται τόσο ο ρόλος όσο και η σπουδαιότητα της υπερπλήρωσης στις μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση. Επίσης, γίνεται μία εκτενής παρουσίαση των χαρακτηριστικών των στροβιλοϋπερπληρωτών, των επιμέρους τμημάτων εκ των οποίων αποτελούνται και το πώς αυτά συνεργάζονται μεταξύ τους, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου γίνεται και η ανάπτυξη της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την επίλυση του φυσικού αυτού προβλήματος.

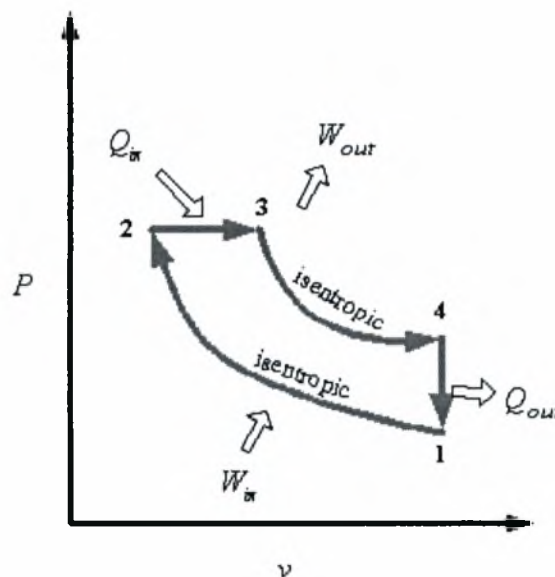
### 2.1 Ο Θερμοδυναμικός Κύκλος Diesel

Ο κύκλος Diesel είναι ο ιδανικός κύκλος των παλινδρομικών μηχανών ανάφλεξης με συμπίεση (CI). Από όλες τις μηχανές εσωτερικής καύσης που γνωρίζουμε σήμερα, ο κινητήρας Diesel είναι ο πιο αποδοτικός. Αυτό σημαίνει ό,τι εξάγει την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από μια συγκεκριμένη ποσότητα καυσίμου [9]. Η πρώτη μηχανή ανάφλεξης με συμπίεση προτάθηκε κατά την δεκαετία του 1890 από τον Rudolf Diesel, από τον οποίο πήρε και την ονομασία της. Αυτή ήταν παρόμοια με τη μηχανή ανάφλεξης με σπινθήρα (SI), αλλά το σημείο που την διαφοροποιεί είναι ο τρόπος με τον οποίο αρχίζει η καύση. Στις μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα, τους γνωστούς βενζινοκινητήρες, το μείγμα καυσίμου-αέρα συμπιέζεται σε μια θερμοκρασία χαμηλότερη από την θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου και η διεργασία της καύσης αρχίζει με τη βοήθεια του σπινθήρα που παράγεται στο μπουζί. Αντίθετα, στις μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση ο αέρας συμπιέζεται σε θερμοκρασία υψηλότερη από την θερμοκρασία αυτανάφλεξης του καυσίμου και η καύση αρχίζει να πραγματοποιείται καθώς το καύσιμο ψεκάζεται μέσα στον θερμό αέρα. Έτσι στους κινητήρες Diesel το καρμπυρατέρ και το μπουζί αντικαθίστανται από έναν ψεκαστήρα καυσίμου [1].

Στους βενζινοκινητήρες, κατά τη διάρκεια της διαδρομής συμπίεσης συμπιέζεται ένα μίγμα αέρα-καυσίμου και οι λόγοι συμπίεσης περιορίζονται από την εμφάνιση της

αυτανάφλεξης και του χτυπήματος της μηχανής. Αντίθετα, στις μηχανές Diesel κατά την συμπίεση συμπιέζεται μόνο αέρας, με αποτέλεσμα να αποκλείεται η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της αυτανάφλεξης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μηχανές Diesel να σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε αρκετά υψηλότερους λόγους συμπίεσης, με τυπικές τιμές αυτών μεταξύ 12 και 24. Η εξάλειψη του φαινομένου της αυτανάφλεξης προσδίδει στους κινητήρες Diesel και ένα άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των βενζινοκινητήρων: το καύσιμο των κινητήρων Diesel δεν χρειάζεται σημαντική κατεργασία, άρα είναι και φθηνότερο, σε σχέση με το καύσιμο που χρησιμοποιούν οι βενζινοκινητήρες, το οποίο υπόκειται σε αυστηρές προδιαγραφές [1].

Στις μηχανές Diesel η διεργασία του ψεκασμού του καυσίμου ξεκινάει όταν το έμβολο πλησιάζει το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) και συνεχίζεται κατά τη διάρκεια του πρώτου τμήματος της διαδρομής ισχύος. Επομένως, στις μηχανές αυτές η διεργασία της καύσης διαρκεί για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα η διεργασία της καύσης στον ιδανικό κύκλο Diesel να μπορεί να προσεγγισθεί από μία ισοβαρή διεργασία προσθήκης θερμότητας. Οι τέσσερις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον κινητήρα Diesel παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα P-v [1].



**Σχήμα 1 – Τυπικός κύκλος Diesel**

- $1 \rightarrow 2$  Ισεντροπική Συμπίεση.
- $2 \rightarrow 3$  Ισοβαρής Προθήκη Θερμότητας.
- $3 \rightarrow 4$  Ισεντροπική Εκτόνωση.
- $4 \rightarrow 1$  Ισόχωρη Απόρριψη Θερμότητας.

Ο κύκλος Diesel πραγματοποιείται μέσα σε μία συσκευή εμβόλου-κυλίνδρου που σχηματίζει ένα κλειστό σύστημα, σε δύο ή τέσσερις περιστροφές του στροφαλοφόρου. Οι δίχρονοι κινητήρες Diesel είναι δημοφιλής σε εφαρμογές όπου μικρές, με έναν ή δύο κυλίνδρους μηχανές απαιτούνται [10]. Οι ποσότητες θερμότητας, που προστίθεται στο ρευστό λειτουργίας με σταθερή πίεση και αφαιρείται από αυτό σε σταθερό όγκο, εκφράζονται ως:

$$\begin{aligned} q_{in} - w_{b,out} &= u_3 - u_2 \rightarrow q_{in} = P_2 (v_3 - v_2) + (u_3 - u_2) \\ &= h_3 - h_2 = C_p (T_3 - T_2) \end{aligned} \quad (2.1)$$

και

$$-q_{out} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{out} = u_4 - u_1 = C_u (T_4 - T_1) \quad (2.2)$$

Τότε, σύμφωνα με τις παραδοχές του πρότυπου κρύου αέρα, η θερμική απόδοση του ιδανικού κύκλου Diesel δίνεται από την σχέση:

$$\eta_{th,Diesel} = \frac{w_{net}}{q_{in}} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{kT_2(T_3/T_2 - 1)} \quad (2.3)$$

Ορίζουμε ως λόγο αποκοπής,  $r_c$ , τον λόγο των όγκων του κυλίνδρου πριν και μετά την διεργασία της καύσης, δηλαδή:

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad (2.4)$$

Με την χρήση αυτού του ορισμού και των ισεντροπικών σχέσεων που ισχύουν για το ιδανικό αέριο στις διεργασίες 1-2 και 3-4, η σχέση (2.3) γράφεται:

$$\eta_{th,Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right] \quad (2.5)$$

όπου,  $r$  είναι ο λόγος συμπίεσης [1].

Επειδή οι κινητήρες Diesel λειτουργούν σε υψηλότερους λόγους συμπίεσης έχουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης από τις μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα. Επίσης,

καίνε πληρέστερα το καύσιμο, εφόσον λειτουργούν συνήθως με λιγότερες στροφές στο λεπτό σε σχέση με τους βενζινοκινητήρες. Οι θερμικές αποδόσεις των μηχανών Diesel κυμαίνονται από 35 έως 40% [1].

Η υψηλότερη απόδοση και το χαμηλότερο κόστος καυσίμου των μηχανών Diesel τις καθιστούν ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες ποσότητες ισχύος όπως στους σιδηροδρόμους, στις εφεδρικές μονάδες παραγωγής ισχύος, στα μεγάλα πλοία και στα βαριά φορτηγά [1]. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των κινητήρων Diesel είναι και το γεγονός ότι εκπέμπουν εξαιρετικά χαμηλές ποσότητες άκαυστων υδρογονανθράκων (HC) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO) [11].

Η προσέγγιση της διεργασίας της καύσης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης με μία ισόχωρη ή μία ισοβαρή διεργασία προσθήκης θερμότητας είναι υπερβολικά απλοϊκή και δεν ανταποκρίνεται πάντα στην πραγματικότητα. Πιθανότατα, μία καλύτερη, αλλά και πολύπλοκότερη, προσέγγιση θα ήταν εκείνη της προτυποποίησης της διεργασίας της καύσης σαν τον συνδυασμό δύο διεργασιών μεταφοράς θερμότητας, η πρώτη εκ των οποίων είναι ισόχωρη και η δεύτερη ισοβαρής. Ο ιδανικός κύκλος που βασίζεται σε αυτή την ιδέα ονομάζεται **διπλός κύκλος** [1].

## 2.2 Η Υπερπλήρωση των Κινητήρων Diesel

Συχνά είναι αναγκαία η αύξηση της ισχύος του κινητήρα Diesel, ώστε αυτός να ανταποκριθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στις ανάγκες για παραγωγή ελκτικού φορτίου κατά τη λειτουργία του σε δηζελάμαξες ή δηζελοηλεκτράμαξες, ή και σε άλλες εφαρμογές. Η αύξηση της ισχύος του κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους:

**A.** Αυξάνοντας το μέγεθος του κινητήρα.

**B.** Αυξάνοντας τη μάζα του αέρα που συμπιέζεται στους κυλίνδρους με την χρησιμοποίηση ενός υπερπληρωτή ή ενός στροβιλοϋπερπληρωτή [2].

Αυξάνοντας το μέγεθος του κινητήρα, έτσι ώστε μεγαλύτερη μάζα αέρα-καυσίμου να καεί και να παραχθεί με αυτόν τον τρόπο περισσότερη ισχύ, αυξάνεται το κόστος καυσίμου αφού καίγεται μεγαλύτερη ποσότητα αυτού. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο ο κινητήρας γίνεται βαρύτερος και μεγαλύτερος με αποτέλεσμα και το όχημα να πρέπει να



σχεδιασθεί με άλλες προδιαγραφές διαστάσεων και ανοχών, ώστε να είναι ικανό να χρησιμοποιήσει τον κινητήρα [2].

Η χρήση ενός υπερπληρωτή αυξάνει την πίεση του αέρα στην είσοδο του κινητήρα. Καθώς η πίεση του αέρα είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, αυξάνεται η πυκνότητα του αέρα, δηλαδή η ποσότητα οξυγόνου ανά λίτρο αέρα. Όταν ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής του κυλίνδρου μεγαλύτερη ποσότητα αέρα εισέρχεται σε αυτόν για να καεί με το καύσιμο. Έτσι, περισσότερη ισχύς παράγεται στον κινητήρα, αλλά ο υπερπληρωτής κινείται απευθείας από τον κινητήρα με αποτέλεσμα, ενώ θεωρητικά θα μπορούσε να αυξήσει την ισχύ ενός κινητήρα, παραδείγματος χάριν 200hp σε 275hp, επειδή για να λειτουργήσει απαιτεί ισχύ, παραδείγματος χάριν 50hp, αυξάνει ουσιαστικά την ισχύ του κινητήρα κατά 25hp [2].

Ο στροβιλοϋπερπληρωτής συμπεριφέρεται κατά παρόμοιο τρόπο με έναν υπερπληρωτή και συμπιέζει τον αέρα στην εισαγωγή του κινητήρα. Καθώς η βαλβίδα εισαγωγής του κυλίνδρου ανοίγει, μεγαλύτερη ποσότητα αέρα εισέρχεται για να καεί με το καύσιμο, ώστε να παραχθεί περισσότερη ισχύς. Αντίθετα με τον υπερπληρωτή, ο στροβιλοϋπερπληρωτής δεν αφαιρεί ισχύ από τον κινητήρα για να λειτουργήσει, αλλά εκμεταλλεύεται την ενέργεια των καυσαερίων του κινητήρα για να κινηθεί ο στρόβιλος, ο οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω ενός άξονα με τον συμπιεστή. Σε μεγάλα υψόμετρα, όπου δεν υπάρχει αρκετό οξυγόνο να καεί με το καύσιμο, έχουμε χαμηλή παραγωγή ενέργειας και κακή καύση. Τότε ο στροβιλοϋπερπληρωτής περιστρέφεται γρηγορότερα, ώστε να αυξηθεί η παροχή αέρα στον κινητήρα και αυτός να ισορροπήσει. Μπορούμε να αυξήσουμε περαιτέρω την ισχύ του κινητήρα αν προσθέσουμε εκτός του στροβιλοσυμπιεστή και ένα σύστημα ψύξης, που μεταφέρει τη θερμότητα συμπίεσης μεταξύ των τμημάτων του συμπιεστή (Intercooler) ή μειώνει την θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του συμπιεστή (Aftercooler). Η ψύξη του αέρα έχει σαν αποτέλεσμα την εισαγωγή περισσότερου οξυγόνου ανά κύλινδρο, που συνεπάγεται μεγαλύτερη ισχύ [2].

Συμπερασματικά, τα προτερήματα της στροβιλοϋπερπλήρωσης είναι τα εξής:

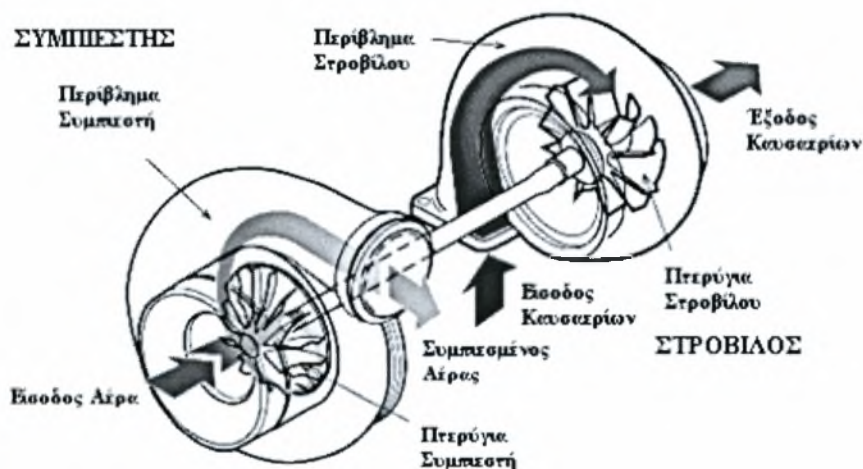
- Αύξηση της εξερχόμενης ισχύος έως και 50%.
- Βελτίωση στην κατανάλωση του καυσίμου.
- Βελτίωση της εκπομπής καυσαερίων.



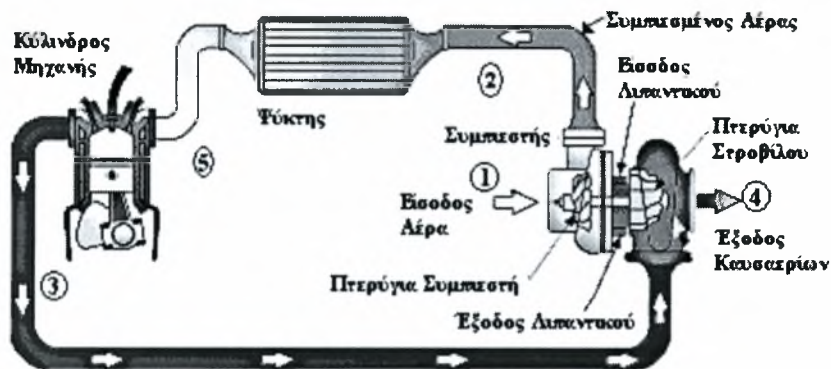
- Εξισορρόπηση του συστήματος σε μεγάλα υψόμετρα [2].

## 2.3 Κατασκευή και Λειτουργία των Στροβιλοϋπερπληρωτών

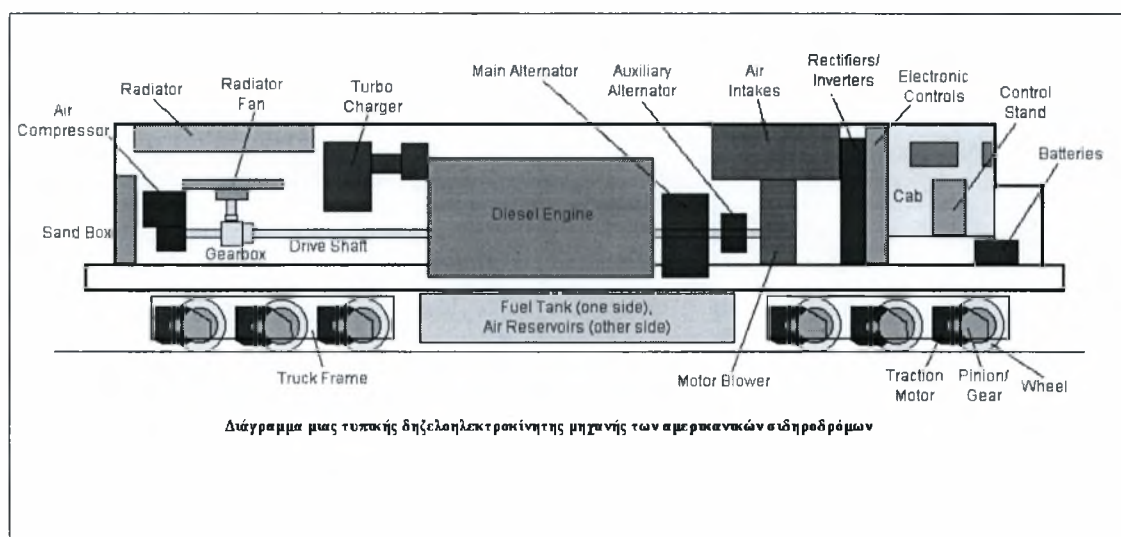
Οι στροβιλοϋπερπληρωτές είναι ακτινικοί συμπιεστές που εφαρμόζονται σε πολλούς τύπους μηχανών Diesel ώστε να αυξήσουν την πίεση του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα. Η απαιτούμενη ισχύς για την κίνηση των συμπιεστών δίδεται από έναν στρόβιλο που κινείται από τα καυσάερια του κινητήρα, εκμεταλλευόμενος μέρος της ενέργειας αυτών. Η απαιτούμενη ισχύς μεταδίδεται από τον στρόβιλο στον συμπιεστή μέσω ενός κοινού άξονα. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται το σύστημα του στροβιλοσυμπιεστή με τις ροές των αερίων, η συναρμογή του συστήματος με τον κινητήρα και η θέση του σε μία τυπική δηζελοηλεκτροκίνητη μηχανή τραίνου [3].



Σχήμα 2 – Το σύστημα του στροβιλοσυμπιεστή



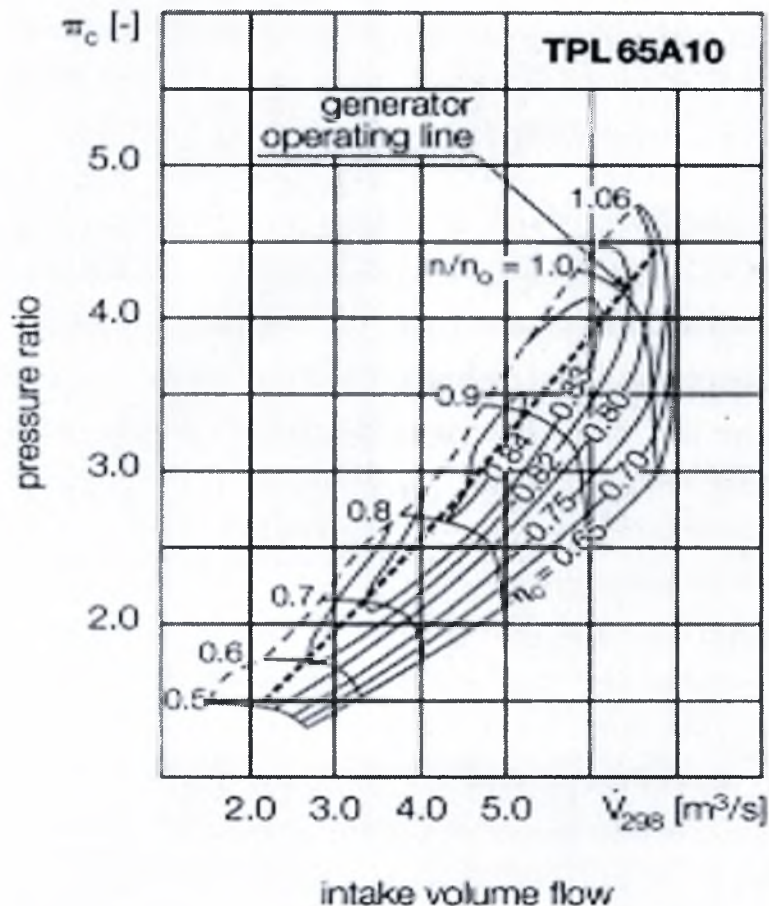
Σχήμα 3 – Η συναρμογή



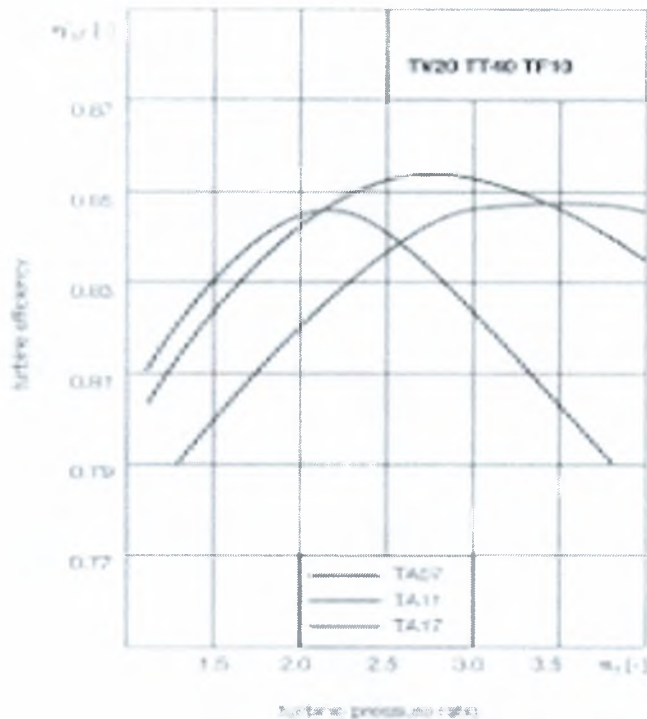
Σχήμα 4 – Στροβιλοϋπερπληρωτής σε δηζελοηλεκτροκίνητη μηχανή τρένου

Οι σύγχρονοι στροβιλοϋπερπληρωτές μπορούν να περιστρέφονται με ταχύτητες άνω των 150,000 rpm [4]. Αυτή η ταχύτητα δεν εξαρτάται από την ταχύτητα του κινητήρα, αλλά από το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της ενέργειας που μεταδίδεται από τα καυσάερα στο στρόβιλο και της ισχύος που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι χάρτες λειτουργίας ενός συμπιεστή και ενός

στροβίλου για τις πιο κοινές χρήσεις των στροβιλοϋπερπληρωτών [5]. Η περιοχή λειτουργίας του συμπιεστή βρίσκεται δεξιά της surge line, όπου οι γραμμές καθορίζουν την ευσταθή λειτουργία του συμπιεστή. Οι στροβιλοϋπερπληρωτές δεν μπορούν να λειτουργήσουν στην περιοχή ασταθούς λειτουργίας, αριστερά της surge line.



Σχήμα 5 – Τυπικός χάρτης Συμπιεστή



**Σχήμα 6 – Τυπικός χάρτης Στροβίλου**

Οι χάρτες αποτελούν την ταυτότητα ενός στροβίλου ή ενός συμπιεστή. Ο χάρτης του συμπιεστή συσχετίζει τέσσερις παραμέτρους:

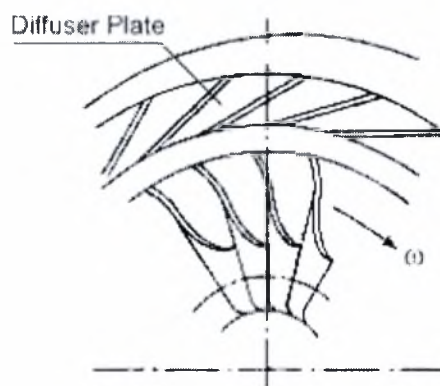
1. Την παροχή του αέρα
2. Τον λόγο συμπίεσης
3. Τις στροφές του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή και
4. Την απόδοση του συμπιεστή

Επιπλέον, στον χάρτη του Σχήματος 5, δίδεται και η γραμμή λειτουργίας της γεννήτριας του δηζελοηλεκτροκίνητου κινητήρα. Συνήθως ο χάρτης του συμπιεστή χρησιμοποιείται κατά τρόπο τέτοιο, που δίνοντας τον λόγο συμπίεσης PRC και τις στροφές του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή  $n/n_0$ , με  $n_0$  οι στροφές σχεδιασμού του συμπιεστή, να υπολογίζεται η απαιτούμενη παροχή αέρα και η απόδοση αυτού.

Αντίστοιχα, ο χάρτης του στροβίλου συσχετίζει τον λόγο εκτόνωσης PRT με την απόδοση αυτού. Στο Σχήμα 6 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τριών τύπων στροβίλου.

Κατά πλήρη αντιστοιχία με την περίπτωση του συμπιεστή, θεωρούμε ένα λόγο εκτόνωσης για τον στρόβιλο και από τον χάρτη υπολογίζεται η απόδοση αυτού.

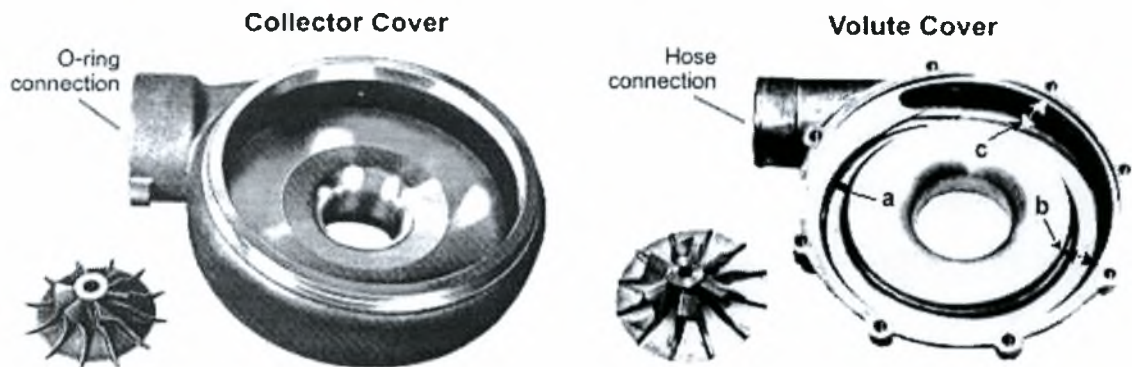
Στους αξονικούς συμπιεστές, φιλτραρισμένος αέρας εισέρχεται από το κέντρο του καλύμματος του συμπιεστή και οδηγείται μέσω του ενχυτή στο στροφείο του συμπιεστή. Καθώς ο αέρας κινείται στο στροφείο εκτελεί στροφή  $90^\circ$ , με αποτέλεσμα την αλλαγή της ροής του από αξονική σε ακτινική. Ο εξερχόμενος από τον συμπιεστή αέρας, εισέρχεται σε σταθερά οδηγία πτερύγια ενός διαχύτη όπως στην παρακάτω εικόνα [4]. Από τα πτερύγια του διαχύτη, ο αέρας εκτονώνεται σε ένα συλλέκτη που ονομάζεται σπείρα (Volute).



**Σχήμα 7 – Τμήμα αξονικού συμπιεστή και πτερυγίων διαχύτη**

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δύο σπείρες και τα αντίστοιχα στροφεία του συμπιεστή. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο σπείρες έγκειται στον τρόπο που αυτές συνδέονται στις σωληνώσεις στην έξοδο των σπειρών. Παρατηρούμε στην τομή του κελύφους μια συνεχή αύξηση του όγκου του, μέχρι ο αέρας να εκτονωθεί στην είσοδό του στη σωλήνωση. Η βαθμιαία αυτή αύξηση από το a, στο b, στο c στο Σχήμα 8, βοηθά στην μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε δυναμική, ή αλλιώς της ταχύτητας του αέρα σε πίεση [3]. Ταυτόχρονα με την αύξηση της πίεσης, ο αέρας αυξάνει και την θερμοκρασία του, με αποτέλεσμα μείωση της πυκνότητάς του. Έτσι, η χρήση ενός ψύκτη (Aftercooler ή Intercooler) είναι απαραίτητη για την αύξηση της πυκνότητας του αέρα που εισέρχεται στον κινητήρα.



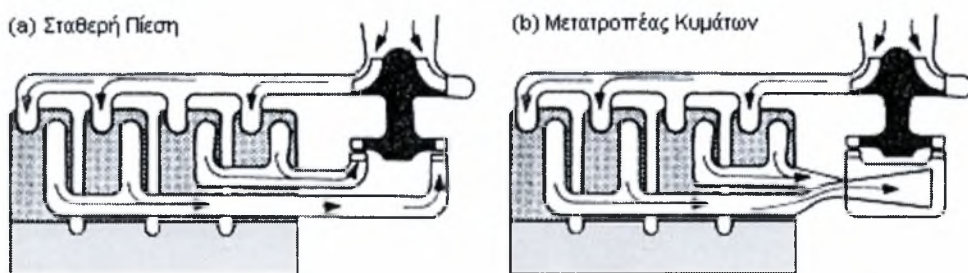


**Σχήμα 8 – Φωτογραφίες δύο σπειροειδών καλυμμάτων**

Τα περύγια του στροφείου του συμπιεστή είναι είτε κάθετα, ακτινικά από το κέντρο της βάσης του στροφείου, είτε με κλίση προς τα πίσω, μακριά από τη φορά περιστροφής του στροφείου. Τα περύγια σχεδιάζονται έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση, από την ελαχιστοποίηση των φαινομένων τύρβης ανάμεσα στα κανάλια που δημιουργούνται από δύο διαδοχικά περύγια. Το στροφείο του συμπιεστή κατασκευάζεται από αλουμίνιο και τα περύγια έχουν πολύ κοντινές ανοχές με το κέλυφος (housing), ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ανάντη ροή του αέρα.

Το άλλο σημαντικό τμήμα των στροβιλοϋπερπληρωτών είναι η τουρμπίνα. Το στροφείο του στροβίλου είναι κατασκευασμένο από ένα κράμα νικελίου και περιστρέφεται γύρω από τον κοινό άξονα που το συνδέει με το στροφείο του συμπιεστή. Ο κύριος σκοπός του στροβίλου είναι να εκμεταλλευτεί τα καυσαέρια του κινητήρα, εκτονώνοντάς τα όταν ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής, ώστε να δώσει κίνηση στο στροφείο του συμπιεστή. Ο στρόβιλος περιστρέφεται εντός ενός κελύφους που συνδέεται με την έξοδο των καυσαερίων μέσω μιας φλάντζας, συνήθως τετραγωνικού σχήματος. Η σύνδεση μεταξύ της εξόδου των καυσαερίων και του κελύφους παίζει σημαντικό ρόλο στην δυναμική συμπεριφορά του στροβιλοϋπερπληρωτή. Αυξάνοντας τον όγκο αυτής της σύνδεσης και της εξόδου των καυσαερίων, κυματισμοί από τις βαλβίδες εξόδου που εκτονώνονται στην εξαγωγή μετατρέπονται σε πίεση που είναι σχεδόν σταθερή. Για το λόγο αυτό, αυτή η μέθοδος σύνδεσης στροβιλοϋπερπληρωτών στην εξαγωγή των κινητήρων αναφέρεται ως σταθερής πίεσης (constant pressure). Ενώ αυτή η μέθοδος διασφαλίζει την συνεχή ροή των καυσαερίων στα περύγια της τουρμπίνας, το γεγονός

ό,τι αυτή η σταθερή πίεση είναι μεγαλύτερη της πίεσης εισόδου του αέρα στον κινητήρα διαταράσσει την θετική ροή του αέρα στον κινητήρα και μειώνει την συνολική του ογκομετρική απόδοση. Μια δεύτερη μέθοδος σύνδεσης της εξόδου των καυσαερίων και του κελύφους της τουρμπίνας κάνει χρήση της κυματικής φύσης των καυσαερίων που προέρχονται από κάθε βαλβίδα εξόδου και ονομάζεται κυματική μέθοδος (pulse method). Ένας κοινός σχεδιασμός συνδέει τους μπροστά κυλίνδρους σε μία πολλαπλή εξαγωγή που οδηγεί στη μία πλευρά της φλάντζας σύνδεσης, και οι πίσω κύλινδροι σε μία άλλη πολλαπλή εξαγωγή που οδηγεί στην άλλη πλευρά της ίδιας φλάντζας (Σχήμα 9 - α) [6].



**Σχήμα 9 – Συστήματα σταθερής πίεσης και μετατροπέα κυμάτων**

Αυτή η μέθοδος προτιμάτε σε εφαρμογές όπου η αντίδραση της μηχανής είναι σημαντική, αφού η ενέργεια των κυμάτων διασκορπίζεται στα περύγια της τουρμπίνας, διατηρώντας την πίεση εξόδου χαμηλή. Η τρίτη και τελευταία μέθοδος σύνδεσης ονομάζεται μετατροπέας κυμάτων (pulse converter). Εδώ χρησιμοποιείται ένα δοχείο Venturi που μετατρέπει την κινητική ενέργεια των καυσαερίων σε δυναμική (Σχήμα 9 - β). Η μέθοδος μοιάζει με αυτή της σταθερής πίεσης. Γενικά, συστήματα σταθερής πίεσης χρησιμοποιούνται σε δίχρονους κινητήρες και τα συστήματα διατήρησης της πίεσης είναι δημοφιλή στους τετράχρονους κινητήρες [6].

Αξίζει να σημειωθεί ό,τι το κέλυφος των στροβίλων λειτουργεί ως ασπίδα ασφαλείας, αφού σχεδιάζεται με μεγάλο πάχος τοιχώματος, ώστε να συγκρατεί τα περύγια του στροβίλου σε περίπτωση καταστροφής αυτών. Συχνά καλούνται και ως «θερμά κελύφη» (hot housings). Φυσικά, η χρήση στροβιλοϋπερπληρωτών βελτιώνει την ογκομετρική απόδοση και επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερης ισχύος, λόγω της αυξημένης παροχής

καυσίμου, δημιουργώντας υψηλότερες πιέσεις στους κυλίνδρους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλών μηχανικών φορτίων και την ανάγκη για πιο στιβαρό σχεδιασμό των τμημάτων του κινητήρα [7].

Το σύστημα εδράνων του στροβιλοϋπερπληρωτή λιπαίνεται με λάδι από την μηχανή. Το λιπαντικό μεταφέρεται υπό πίεση στο περίβλημα των εδράνων, στα έδρανα κύλισης και στο σύστημα ώσης (thrust system). Το λιπαντικό λειτουργεί ακόμα και ως ψυκτικό μέσο απομακρύνοντας τη θερμότητα που παράγεται στον στρόβιλο [2].

Τα έδρανα κύλισης είναι τύπου ελεύθερης περιστροφικής μεταβολής (free-floating rotational type). Για να λειτουργούν σωστά πρέπει να κινούνται ανάμεσα σε ένα φιλμ λιπαντικού. Οι αποστάσεις μεταξύ των εδράνων είναι πολύ μικρές, μικρότερες της τάξης των 50  $\mu\text{m}$  [2].

Παρόλο που έχουν εντοπισθεί σημαντικά προτερήματα στη χρήση των στροβιλοϋπερπληρωτών, έχουν από την άλλη και ορισμένα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά. Ένα παράδειγμα είναι το φαινόμενο **υστέρησης στροβιλοϋπερπληρωτή** (Turbocharger Lag). Από την στιγμή που οι στροβιλοϋπερπληρωτές κινούνται από τα κύματα που δημιουργούνται από την εκτόνωση των καυσαερίων στον κινητήρα, είναι απαραίτητο να σχηματισθούν σημαντικές ποσότητες καυσαερίων μέχρι ο στροβιλοϋπερπληρωτής να περιστραφεί με ταχύτητες που θα ήταν ικανές να υπερπληρώσουν τον κινητήρα. Για παράδειγμα, όταν ο οδηγός απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ πατώντας το γκάζι, περισσότερο καύσιμο ενχύεται στους κυλίνδρους. Παρόλα αυτά, η αυξημένη αυτή ποσότητα καυσίμου πρέπει πρώτα να καεί και να παράγει καυσαέρια, πριν ο στρόβιλος μπορέσει να επιταχύνει και να κινήσει τον συμπίεστή, ο οποίος θα παραδώσει μεγαλύτερη ποσότητα αέρα στους κυλίνδρους. Αυτή η χρονική παρέκκλιση ανάμεσα στην εισαγωγή περισσότερης ποσότητας καυσίμου και στην ανταπόκριση του συστήματος του στροβιλοσυμπίεστή, ώστε να παραδοθεί η απαιτούμενη ποσότητα αέρα, ονομάζεται υστέρηση στροβιλοϋπερπληρωτή (Turbocharger Lag). Η καύση κατά την διάρκεια του φαινομένου χαρακτηρίζεται από μία στιγμιαία πτώση του λόγου αέρα / καυσίμου, προκαλώντας την απελευθέρωση μιας ορατής ποσότητας καπνού [7].

Ένα άλλο πρόβλημα που συναντάται στον σχεδιασμό των στροβιλοϋπερπληρωτών και στο συνδυασμό αυτών σε μία συγκεκριμένη μηχανή είναι η χαμηλή απόδοσή τους σε



χαμηλές στροφές και φορτία του κινητήρα. Σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, η κυματική δύναμη των καυσαερίων είναι ιδιαίτερα χαμηλή, αφού η μηχανή χρησιμοποιεί μικρές ποσότητες αέρα και καυσίμου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι σχεδιαστές κινητήρων οδηγούνται στη χρήση στροβιλοϋπερπληρωτών που έχουν στροφεία με μικρές ροπές αδρανείας, ώστε να επιτύχουν γρήγορες επιταχύνσεις και ταχύτητες περιστροφής. Τέτοιοι σχεδιασμοί μπορεί να είναι ευνοϊκοί για μικρές ταχύτητες και φορτία, αλλά είναι επιζήμιοι για την λειτουργία σε υψηλές στροφές και φορτία. Σε αυτή την περίπτωση και για δεδομένη εφαρμογή, σοβαρή μελέτη γίνεται σε άλλες τροποποιήσεις του σχεδιασμού των στροβιλοϋπερπληρωτών, για την αποφυγή ανάπτυξης εξαιρετικά υψηλών πιέσεων στην είσοδο του κινητήρα, όταν αυτός λειτουργεί σε υψηλές στροφές. Εκτός των εν δυνάμει προβλημάτων που σχετίζονται με τις υψηλές πιέσεις υπερπλήρωσης, σοβαρά προβλήματα με την ποιότητα της καύσης μπορεί να αντιμετωπισθούν.

Οι κινητήρες Diesel λειτουργούν καλύτερα όταν τα συστήματα εισόδου και εξόδου τους δεν περιορίζονται. Η τοποθέτηση ενός στροφείου στροβίλου στην δίοδο των καυσαερίων περιορίζει την ροή τους και μπορεί να προκαλέσει μια πτώση στην ογκομετρική απόδοση του συστήματος του κινητήρα. Παρόλα αυτά, αυτή η πτώση της απόδοσης αντισταθμίζεται από την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στην μηχανή από τον στροβιλοϋπερπληρωτή. Το γεγονός αυτό είναι περισσότερο εμφανές όταν οι κινητήρες λειτουργούν σε μεγάλα υψόμετρα, όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι χαμηλότερη από αυτή στο επίπεδο της θάλασσας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η λειτουργία των κινητήρων φυσικής αναπνοής ανέχεται σημαντικά ελλείμματα αέρα, που μπορεί ακόμα και να προκαλέσουν απορύθμιση της παροχής στον κινητήρα. Έτσι, η στροβιλοϋπερπλήρωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντισταθμιστής ύψους, διατηρώντας τον ρυθμό της παραγόμενης ισχύος του κινητήρα.

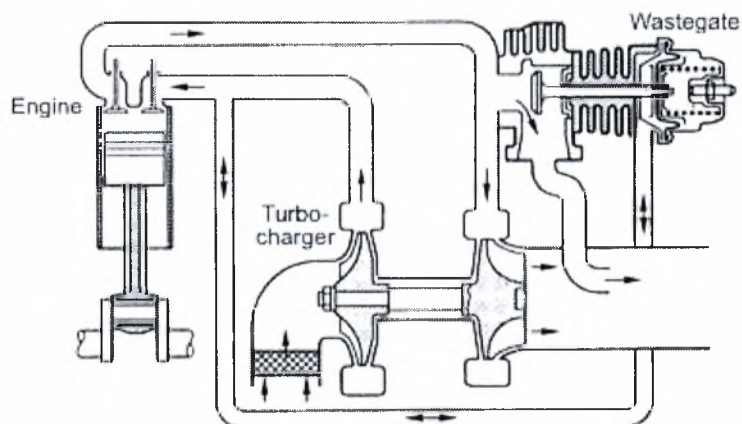
### **2.3.1 Τύποι Στροβιλοϋπερπληρωτών**

Οι περισσότεροι στροβιλοϋπερπληρωτές είναι συμπίεστές ακτινικής ροής συνδεδεμένοι με στροβίλους αξονικής ροής. Παρόλα αυτά, με τον πολλαπλασιασμό των εφαρμογών που απαιτούν στροβιλοϋπερπλήρωση και συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου

της εκπομπής καυσαερίων, νέοι σχεδιασμοί και τύποι στροβιλοϋπερπληρωτών είναι απαραίτητοι. Μερικοί από τους σχεδιασμούς αυτούς δεν προέκυψαν από νέες μελέτες, αλλά εμπεριέχουν διαφοροποιήσεις των ήδη υπάρχοντων γεωμετριών. Η κύρια βάση της χρήσης των μοντέρνων στροβιλοϋπερπληρωτών είναι ό,τι επιτυγχάνουν σχεδόν σταθερή πίεση αέρα υπερπλήρωσης σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών λειτουργίας του κινητήρα. Η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί τον έλεγχο της λειτουργίας του στροβιλοσυμπιεστή με έναν ελαστικό τρόπο. Αυτό γίνεται ρυθμίζοντας την έξοδο των καυσαερίων ή την έξοδο του αέρα από τον συμπιεστή. Η ρύθμιση των καυσαερίων μπορεί να γίνει με την χρήση υπερπληρωτών με βαλβίδες εκτόνωσης των καυσαερίων (Waste-Gating Turbocharging) και μεταβλητής γεωμετρίας (Variable Geometry Turbocharging).

### 2.3.1.1 Υπερπληρωτές με Βαλβίδες Εκτόνωσης Καυσαερίων (Waste-Gating Turbochargers)

Οι υπερπληρωτές αυτού του τύπου τίθενται σε κίνηση «πνευματικά», βασιζόμενοι σε ένα σήμα πίεσης στο σύστημα εισόδου. Στο Σχήμα 10 βλέπουμε μια αναπαράσταση στροβιλοϋπερπληρωτή με ένα μηχανισμό παράκαμψης των καυσαερίων στον στρόβιλο [8]. Η ρύθμιση της παράκαμψης γίνεται μέσω ενός διαφράγματος που κινεί μία βαλβίδα. Αυτή η διάταξη συνιστά το σώμα της βαλβίδας εκτόνωσης.

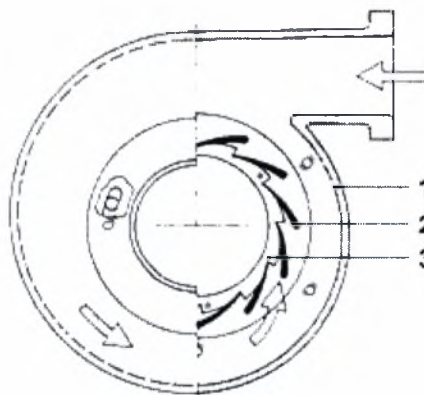


Σχήμα 10 – Στροβιλοϋπερπληρωτής με βαλβίδα εκτόνωσης καυσαερίων

Σε πρακτικές εφαρμογές, ένα σήμα πίεσης από την εισαγωγή του κινητήρα στέλνεται στη βαλβίδα. Η δύναμη που παράγεται από την εφαρμογή της πίεσης εκτονώνει το ελατήριο στην διάταξη της βαλβίδας, ανοίγοντας έτσι την παράκαμψη, που οδηγεί τα καυσαέρια εκτός στροβίλου και διασκορπίζει την κυματική τους ενέργεια απευθείας στην έξοδο. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τον σχεδιασμό στροβιλοϋπερπληρωτών που μπορούν εύκολα να επιταχύνουν όταν εκτίθενται σε χαμηλές ενέργειες καυσαερίων, αναπτύσσοντας έτσι επαρκή πίεση εισόδου στον κινητήρα, αλλά και αποφεύγεται η εισαγωγή υψηλών πιέσεων σε υψηλές ταχύτητες και φορτία του κινητήρα.

### 2.3.1.2 Υπερπληρωτές Μεταβλητής Γεωμετρίας (Variable Geometry Turbochargers)

Στους στροβιλοϋπερπληρωτές με βαλβίδα εκτόνωσης μέρος της κυματικής ενέργειας των καυσαερίων δεν χρησιμοποιείται για την περιστροφή του στροβίλου. Η διασκόρπιση αυτής της ενέργειας στην ατμόσφαιρα, αντί της χρήσης της, μπορεί να θεωρηθεί ως χάσιμο που μπορεί να μειώσει την συνολική απόδοση του συστήματος. Μία εναλλακτική πρόταση στο παραπάνω επιχείρημα είναι ο στροβιλοϋπερπληρωτής μεταβλητής γεωμετρίας, που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

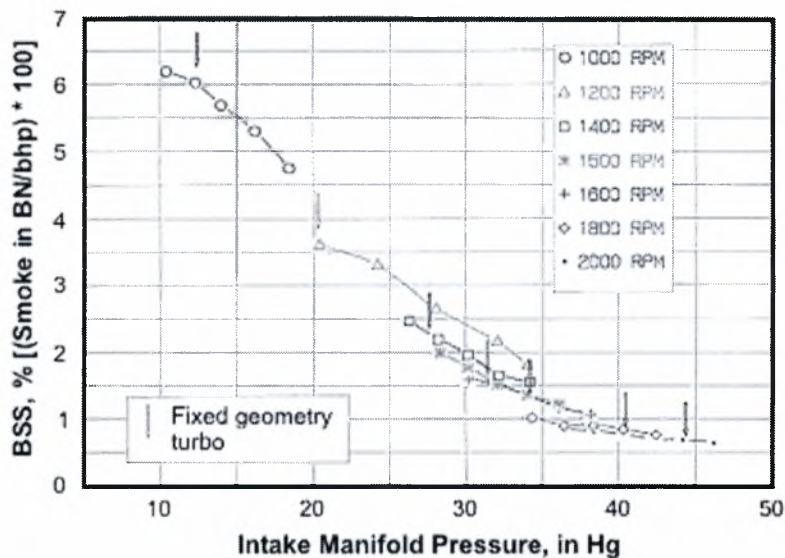


Σχήμα 11 – Στροβιλοϋπερπληρωτής μεταβλητής γεωμετρίας

Στο Σχήμα 11 διακρίνουμε το κέλυφος ενός στροβιλοϋπερπληρωτή μεταβλητής γεωμετρίας (VGT), περύγια μεταβλητής γωνίας και έναν οδοντωτό δακτύλιο ρύθμισης (αντικείμενα 1, 2 και 3 του σχήματος, κατά σειρά). Τα περύγια είναι τοποθετημένα ανάμεσα στην εξαγωγή των καυσαερίων και τον στρόβιλο. Σε συνθήκες χαμηλής ενέργειας των καυσαερίων, τα μεταβλητά περύγια μειώνουν την περιοχή της ροής ανάμεσα σε δύο διαδοχικά περύγια, μετατρέποντας έτσι την δυναμική ενέργεια των καυσαερίων (πίεση) σε κινητική (ταχύτητα). Σε μεγαλύτερη ισχύ των καυσαερίων, τα περύγια του στροβίλου περιστρέφονται γρηγορότερα, δίνοντας στον συμπιεστή περισσότερη ενέργεια για την εισαγωγή μεγαλύτερης ποσότητας αέρα στους κυλίνδρους. Συμπερασματικά για υψηλές συνθήκες εξόδου από τον κινητήρα, τα περύγια τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε μικρό ποσό της δυναμικής ενέργειας των καυσαερίων να μετατρέπεται σε κινητική. Αυτό αποτρέπει τον συμπιεστή από την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων περιστροφής, και έτσι στη μείωση (διόρθωση) της ποσότητας του επιπρόσθετου αέρα που εισέρχεται στους κυλίνδρους.

Οι στροβιλοϋπερπληρωτές μεταβλητής γεωμετρίας προσφέρουν μεγάλη ελαστικότητα στον έλεγχο της λειτουργίας του κινητήρα, αλλά και στην μείωση της εκπομπής καυσαερίων, ειδικά στις σύγχρονες μηχανές όπου η χρήση ηλεκτρονικών είναι πιο διαδεδομένη. Για παράδειγμα, λαμβάνοντας την επιθυμία του οδηγού για γρήγορη επιτάχυνση, ο ηλεκτρονικός έλεγχος θα μπορούσε να προγραμματιστεί να τοποθετήσει τα κινητά περύγια του VGT έτσι ώστε να μειώνεται η περιοχή της ροής των καυσαερίων και να αυξάνεται η ταχύτητα του στροβίλου, παραδίδοντας περισσότερο αέρα στον κινητήρα. Περισσότερος αέρας θα μπορούσε να εισαχθεί στον κινητήρα πριν την απαίτηση μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Αυτή η μεθοδολογία ελέγχου βοηθά στην εξάλειψη του φαινομένου της στιγμιαίας εμφάνισης καπνού που λαμβάνει χώρα κατά τις ξαφνικές επιταχύνσεις. Ένα άλλο προτέρημα των στροβιλοϋπερπληρωτών μεταβλητής γεωμετρίας είναι και ο έλεγχος της πίεσης μεταξύ της εισαγωγής και της εξαγωγής του κινητήρα. Τοποθετώντας τα μεταβλητά περύγια ώστε να μειώσουν την περιοχή της ροής των καυσαερίων, η πίεση στην έξοδο του κινητήρα αυξάνει, ενώ την ίδια στιγμή η πίεση στην είσοδο του κινητήρα μπορεί να μην αυξηθεί κατά τον ίδιο λόγο. Οι μηχανικοί που ασχολούνται με τον έλεγχο της εκπομπής των καυσαερίων χρησιμοποιούν αυτό το χαρακτηριστικό για να επιτύχουν μεγαλύτερη

ανακυκλοφορία των καυσαερίων και έτσι μείωση της εκπομπής των  $\text{NO}_x$ . Στο Σχήμα 12 φαίνεται η σχέση μεταξύ της πίεσης στην είσοδο του κινητήρα με την ποσότητα καυσαερίων για έναν στροβιλοϋπερπληρωτή μεταβλητής γεωμετρίας, σε σταθερές ταχύτητες κινητήρα. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η λειτουργία ενός στροβιλοϋπερπληρωτή σταθερής γεωμετρίας.



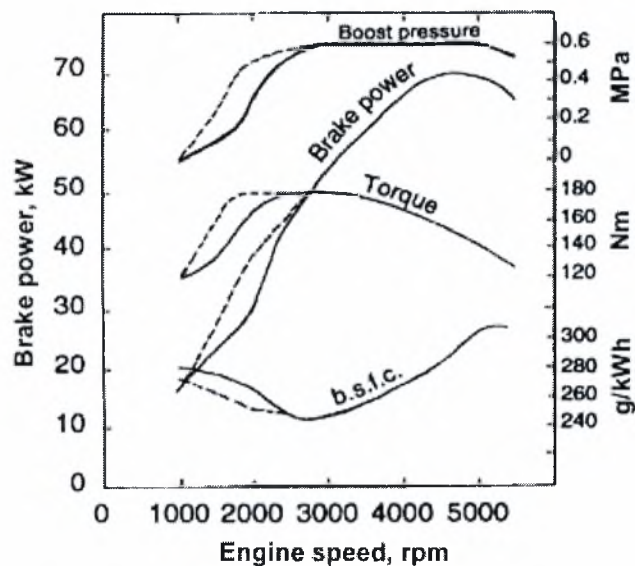
**Σχήμα 12 – Σχέση μεταξύ πίεσεως εισαγωγής κινητήρα και εκπομπής καυσαερίων**

Από το παραπάνω σχήμα μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Η χρήση ενός VGT μπορεί να μειώσει ουσιαστικά την παραγωγή των καυσαερίων.
- Η χρήση ενός VGT είναι αποδοτικότερη σε χαμηλές στροφές του κινητήρα, που αντιστοιχούν σε χαμηλές πιέσεις στην είσοδο αυτού, σε σχέση με έναν στροβιλοϋπερπληρωτή σταθερής γεωμετρίας.
- Η χρήση ενός VGT σε υψηλές συνθήκες κινητήρα, αντί ενός καλά συνταιριασμένου στροβιλοϋπερπληρωτή σταθερής γεωμετρίας, μπορεί να μην δικαιολογηθεί.



Τα κέρδη σε ροπή και εξερχόμενη ισχύ, καθώς και η οικονομία σε καύσιμο, σε αντιστοιχία με αυτά που επιτυγχάνονται στον έλεγχο των καυσαερίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 13.



**Σχήμα 13 – Η επίδραση του VGT σε ροπή, ισχύ και BSFC για ταχύτητες κάτω της μέγιστης ροπής, σε έναν μικρό κινητήρα Diesel**

Σε μερικές περιπτώσεις, η ρύθμιση της ποσότητας του εισερχόμενου στον κινητήρα αέρα γίνεται από την πλευρά του συμπιεστή. Αυτό το σύστημα αναφέρεται ως ρυθμιστής αέρα (Air Gas Regulator). Η μέθοδος της παράκαμψης του αέρα αφού συμπιεστεί δεν είναι τόσο δημοφιλής όσο αυτή της παράκαμψης των καυσαερίων. Ο λόγος είναι η απώλεια ενέργειας για την συμπίεση του αέρα που παρακάμπτεται, αντί της εισαγωγής του στον κινητήρα.

## 2.4 Μεθοδολογία Μελέτης του Προβλήματος

Για την μελέτη του προβλήματος της στροβιλοϋπερπλήρωσης των κινητήρων Diesel ισχύος έως και 1000kW, θα χρησιμοποιήσουμε την διάταξη του Σχήματος 2, ορίζοντας της παρακάτω θέσεις:

- Θέση 1 → Είσοδος Συμπιεστή.
- Θέση 2 → Έξοδος Συμπιεστή / Είσοδος Ψύκτη.
- Θέση 5 → Έξοδος Ψύκτη / Είσοδος Κινητήρα.
- Θέση 3 → Έξοδος Κινητήρα / Είσοδος Στροβίλου.
- Θέση 4 → Έξοδος Στροβίλου.

Έχοντας καθορίσει πλήρως την διάταξη του προβλήματος και τις θέσεις ενδιαφέροντος αυτού, θα αναπτύξουμε το μαθηματικό μοντέλο για τον συγκεκριμένο όγκο ελέγχου με τη βοήθεια κλασικών, βασικών εξισώσεων της θερμοδυναμικής, επίσης θα γίνει κατάστρωση ισοζυγίων ενέργειας και μάζας σε συγκεκριμένους όγκους ελέγχου, έχοντας ως στόχο την εύρεση όλων των επιμέρους άγνωστων θερμοδυναμικών παραμέτρων όπως πιέσεις, θερμοκρασίες, ενθαλπίες, εντροπίες, παροχές μάζας, σύστασης καυσαερίων, λόγων συμπίεσης και εκτόνωσης σε συμπιεστή και στρόβιλο, αντίστοιχα, αλλά και τις αποδόσεις αυτών.

Αφού γίνει λοιπόν η κατάστρωση του μαθηματικού μοντέλου, θα γίνει στη συνέχεια η αριθμητικοποίηση αυτού και ακολούθως θα αναπτυχθεί ένας αριθμητικός κώδικας (σε γλώσσα Fortran), ο οποίος έχοντας ως βάση το μαθηματικό μοντέλο και τις μεθόδους επίλυσης των εξισώσεων που ακολουθήθηκαν κατά την αριθμητικοποίηση, θα υπολογίσει όλες τις άγνωστες παραμέτρους, που προαναφέρθηκαν.

### 3. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται και παρουσιάζεται ένα πλήρες θερμοδυναμικό μοντέλο για το σύστημα του Στροβιλοϋπερπληρούμενου Κινητήρα Diesel και περιγράφονται όλα τα μαθηματικά μοντέλα των επιμέρους στοιχείων του στροβιλοϋπερπληρωτή.

#### 3.1 Υποθέσεις

Οι υποθέσεις που αποτελούν το υπόβαθρο της μοντελοποίησης του συστήματος του Στροβιλοϋπερπληρούμενου Κινητήρα Diesel είναι οι ακόλουθες:

- Το όλο σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης.
- Για τον αέρα και τα προϊόντα της καύσης στον κινητήρα ισχύουν οι αρχές των ιδανικών μειγμάτων.
- Η καύση στον θάλαμο καύσης (κινητήρας Diesel) είναι πλήρης.
- Το πετρέλαιο αποτελείται κυρίως από οκτάνιο  $C_8H_{18}$ .
- Οι απώλειες θερμότητας στον θάλαμο καύσης ανέρχονται στο 2% της κατώτερης θερμογόνου ενέργειας του καυσίμου. Όλα τα υπόλοιπα τμήματα του συστήματος λειτουργούν χωρίς απώλειες θερμότητας [12].

#### 3.2 Μεταβλητές

Στον σχεδιασμό και την βελτιστοποίηση των θερμικών συστημάτων, είναι βολικό να αναγνωρίζονται δύο τύποι ανεξάρτητων μεταβλητών:

- A. οι μεταβλητές απόφασης και
- B. οι παράμετροι.

Οι μεταβλητές απόφασης μπορούν να αλλάζουν κατά την βελτιστοποίηση, αλλά οι παράμετροι παραμένουν σταθερές σε μία δεδομένη εφαρμογή. Όλες οι άλλες



μεταβλητές είναι εξαρτημένες και οι τιμές τους υπολογίζονται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές, με την εφαρμογή των θερμοδυναμικών και μαθηματικών μοντέλων [12].

### 3.2.1 Μεταβλητές Απόφασης

Στο δεδομένο μοντέλο ο λόγος συμπίεσης  $P_2/P_1$ , οι πειραματικές τιμές της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων  $T_{3,\pi}$  και της πίεσης εξόδου αυτών  $P_{3,\pi}$ , θεωρούνται μεταβλητές απόφασης. Παρόλο που οι μεταβλητές απόφασης μεταβάλλονται κατά την βελτιστοποίηση, κάθε μία από αυτές κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών. Παραδείγματος χάριν, ο λόγος συμπίεσης ανάλογα με την τιμή των στροφών  $n/n_0$  του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή, πρέπει να πάρει μία τιμή που να βρίσκεται εντός των ορίων που υπαγορεύει ο χάρτης του συμπιεστή στις δεδομένες στροφές [12].

### 3.2.2 Παράμετροι

Οι παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταβλητές των οποίων οι τιμές είναι καθορισμένες και παραμένουν σταθερές κατά την βελτιστοποίηση. Για το δεδομένο μοντέλο, ως παράμετροι λαμβάνονται οι εξής:

- **Συμπιεστής**

$T_1 = 298,15 \text{ K (25}^\circ\text{C)}$ ,  $P_1 = 1,013 \text{ bar (1 atm)}$

Σύσταση Αέρα (%): 77,48  $\text{N}_2$ , 20,59  $\text{O}_2$ , 0,03  $\text{CO}_2$ , 1,90  $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$

- **Ψύκτης (Intercooler)**

Πτώση πίεσης 2% από την πλευρά του αέρα ( $P_5/P_2 = 0,98$ ), αποτελεσματικότητα του ψύκτη  $\varepsilon$ .

- **Θάλαμος Καύσης**

Θερμοκρασία εισόδου του καυσίμου στο θάλαμο καύσης 298,15 K και θερμική απόδοση του κινητήρα Diesel.

- **Στρόβιλος**

$P_4 = 1,013 \text{ bar}$

### 3.2.3 Εξαρτημένες Μεταβλητές

Οι εξαρτημένες μεταβλητές περιλαμβάνουν τις παροχές αέρα, καυσίμου και καυσαερίων, τα προϊόντα της καύσης και τις ακόλουθες πιέσεις και θερμοκρασίες:

Συμπιεστής	$P_2, T_2$
Ψύκτης	$P_5, T_5$
Θάλαμος Καύσης	$P_{3,actual}, T_{3,actual}$
Στρόβιλος	$T_4$

### 3.3 Θερμοδυναμικές Εξισώσεις Στροβιλοϋπερπληρούμενου Κινητήρα Diesel

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω υποθέσεις, μπορεί να αναπτυχθεί μια ομάδα από χαρακτηριστικές εξισώσεις με τη βοήθεια της θερμοδυναμικής. Αυτό γίνεται για κάθε στοιχείο του στροβιλοϋπερπληρωτή, αλλά και του κύκλου, ξεχωριστά με τη θεώρηση διαφορετικών όγκων ελέγχου.

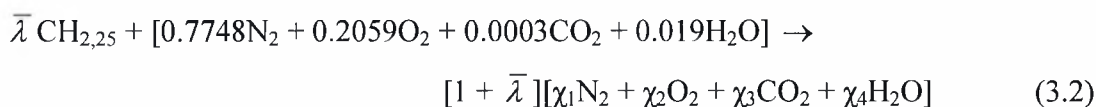
#### 3.3.1 Ο Θάλαμος Καύσης

Ορίζοντας τον λόγο καυσίμου-αέρα σε γραμμομοριακή βάση ως  $\bar{\lambda}$ , οι γραμμομοριακές παροχές καυσίμου, αέρα και προϊόντων της καύσης συνδέονται με τις εξής σχέσεις:

$$\frac{\dot{n}_f}{\dot{n}_a} = \bar{\lambda}, \quad \frac{\dot{n}_p}{\dot{n}_a} = 1 + \bar{\lambda} \quad \text{και} \quad \dot{m}_f = \bar{\lambda} \left( \frac{M_f}{M_a} \right) \dot{m}_a \quad (3.1)$$

όπου, οι δείκτες f, p, a αναφέρονται στο καύσιμο, τα προϊόντα της καύσης και τον αέρα και τα  $M_f$ ,  $M_a$  στα μοριακά βάρη αυτών, αντίστοιχα [12].

Ανάγοντας το οκτάνιο από υδρογονάνθρακα της μορφής  $C_aH_b$  σε  $CH_{b/a}$  και για πλήρη καύση του οκτανίου, η χημική εξίσωση έχει την εξής μορφή:



Εφαρμόζοντας το ισοζύγιο ενέργειας στον θάλαμο καύσης έχουμε:

$$0 = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{n}_f \bar{h}_f + \dot{n}_a \bar{h}_a - \dot{n}_p \bar{h}_p \quad (3.3)$$

όπου, οι ενθαλπίες υπολογίζονται από την σχέση:

$$\bar{h} = 10^3 [H^+ + \alpha y + \frac{b}{2} y^2 - \frac{c}{y} + \frac{d}{3} y^3] \quad (3.4)$$

όπου,  $y = \frac{T}{1000}$  και συντελεστές από πίνακα για την κάθε ουσία (οι πίνακες παρατίθενται στο Παράρτημα Δ) [12].

### 3.3.2 Ο Στροβιλοσυμπιεστής

Λαμβάνοντας ως όγκο ελέγχου τον στροβιλοσυμπιεστή, το ισοζύγιο ενέργειας έχει ως εξής:

$$\dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{n}_a (\bar{h}_1 - \bar{h}_2) + \dot{n}_p (\bar{h}_3 - \bar{h}_4) = 0 \quad (3.5)$$

$$\text{ή } (\bar{h}_1 - \bar{h}_2) + (1 + \bar{\lambda}) (\bar{h}_3 - \bar{h}_4) = 0 \quad (3.6)$$

, αφού δεν παράγεται έργο ούτε υπάρχουν απώλειες θερμότητας στον όγκο ελέγχου [12].

Επίσης, ο ισεντροπικός βαθμός απόδοσης του συμπιεστή δίνεται από την σχέση:

$$\eta_{is,c} = \frac{\bar{h}_{2s} - \bar{h}_1}{\bar{h}_2 - \bar{h}_1} \quad (3.7)$$

, ενώ αντίστοιχα για τον στρόβιλο:

$$\eta_{is,t} = \frac{\bar{h}_3 - \bar{h}_4}{\bar{h}_3 - \bar{h}_{4s}} \quad (3.8)$$

### 3.3.3 Ο Ψύκτης (Intercooler)

Ο ψύκτης ανήκει στην κατηγορία των ψυκτών αέρα – προς – αέρα, με αποτελεσματικότητα  $\varepsilon$ . Λαμβάνοντας ως όγκο ελέγχου τον ψύκτη έχουμε:

$$\varepsilon = \frac{\bar{h}_2 - \bar{h}_5}{\bar{h}_2 - \bar{h}_c} \quad (3.9)$$

όπου,  $\bar{h}_c = \bar{h}_l$  η ενθαλπία του αέρα ψύξης.

## 4. ΑΡΙΘΜΗΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η αριθμητική επίλυση των παραπάνω εξισώσεων και ισοζυγίων με τις διάφορες μαθηματικές μεθόδους, αλλά και ο πηγαίος αριθμητικός κώδικας «GAS TURBOCHARGER INTEGRATION SYSTEM», που αναπτύχθηκε από τον Γάστη Βασίλειο.

### 4.1 Περιγραφή του Αριθμητικού Μοντέλου

Ξεκινάμε την διαδικασία από τον χάρτη του Συμπιεστή, απ' όπου με γνωστά τις στροφές του άξονα του στροβίλοσυμπιεστή και τον λόγο συμπίεσης υπολογίζουμε την παροχή του αέρα  $\dot{m}_a$  και την απόδοση του συμπιεστή  $\eta_{com}$ . Ακολουθώντας, από την ισεντροπική συμπίεση έχουμε:

$$\begin{aligned}\bar{s}_{2s} - \bar{s}_1 &= 0.7748[\bar{s}^0(T_{2s}) - \bar{s}^0(T_1) - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1}]_{N_2} \\ &+ 0.2059[\bar{s}^0(T_{2s}) - \bar{s}^0(T_1) - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1}]_{O_2} \\ &+ 0.0003[\bar{s}^0(T_{2s}) - \bar{s}^0(T_1) - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1}]_{CO_2} \\ &+ 0.0190[\bar{s}^0(T_{2s}) - \bar{s}^0(T_1) - \bar{R} \ln \frac{P_2}{P_1}]_{H_2O} \\ &= 0\end{aligned}\quad (4.1)$$

, οπότε και υπολογίζεται η θερμοκρασία  $T_{2s}$  και η ενθαλπία  $\bar{h}_{2s}$  από την σχέση (3.4). Οι εντροπίες υπολογίζονται από την σχέση [12]:

$$\bar{s}^0 = S^- + a \ln T + by - \frac{c}{2} y^{-2} + \frac{d}{2} y^2, \quad y = \frac{T}{1000}\quad (4.2)$$

Στη συνέχεια, με γνωστά την  $T_1$  και  $\eta_{com}$  και από την σχέση (3.7), υπολογίζουμε την ενθαλπία  $\bar{h}_2$  και επιλύουμε την εξίσωση (3.4) με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson για να υπολογίσουμε την θερμοκρασία  $T_2$ . Στον ψύκτη, χρησιμοποιώντας την

σχέση (3.9), για δεδομένη αποτελεσματικότητα  $\varepsilon$ , βρίσκουμε την  $\bar{h}_5$  και με Newton-Raphson βρίσκουμε την  $T_5$ .

Ορίζοντας τον λόγο καυσίμου-αέρα ως  $\bar{\lambda}$  και με βάση τις σχέσεις (3.1) και (3.2), ισορροπούμε κατά σειρά τον άνθρακα, το υδρογόνο, το οξυγόνο και τέλος το άζωτο [12]. Έτσι η μοριακή σύσταση των καυσαερίων θα δίνεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} x_{N_2} &= \frac{0.7748}{1 + \bar{\lambda}}, & x_{O_2} &= \frac{0.2059 - 1.5625\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \\ x_{CO_2} &= \frac{0.0003 + \bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}}, & x_{H_2O} &= \frac{0.019 + 1.125\bar{\lambda}}{1 + \bar{\lambda}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Αν λοιπόν υπολογισθεί ο λόγος καυσίμου-αέρα, τότε ταυτόχρονα καθορίζεται και η σύσταση των καυσαερίων. Για να υπολογισθεί ο λόγος αυτός, από το ισοζύγιο ενέργειας στον θάλαμο καύσης (εξίσωση (3.3)), έχοντας υποθέσει ότι οι απώλειες θερμότητας ανέρχονται στο 2%, έχουμε:

$$\dot{Q}_{cv} = -0,02 \dot{n}_f \bar{LHV} = \dot{n}_a (-0.02\bar{\lambda} \bar{LHV}) \quad (4.4.a)$$

, οπότε η εξίσωση (3.3) γράφεται:

$$0 = (-0.02\bar{\lambda} \bar{LHV}) - n_{thermal} \bar{\lambda} \bar{LHV} + \bar{h}_a + \bar{\lambda} \bar{h}_f - (1 + \bar{\lambda}) \bar{h}_p \quad (4.4.b)$$

Χρησιμοποιώντας τις αρχές των ιδανικών μειγμάτων για τον υπολογισμό των ενθαλπιών του αέρα και των προϊόντων της καύσης, με γνωστές τις θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου από τον κινητήρα  $T_5$  και  $T_3$ , έχουμε:

$$\bar{h}_a = [0,7748 \bar{h}_{N_2} + 0,2059 \bar{h}_{O_2} + 0,0003 \bar{h}_{CO_2} + 0,019 \bar{h}_{H_2O}] \quad (4.5)$$

, σε θερμοκρασία  $T_5$  και

$$\begin{aligned} (1 + \bar{\lambda}) \bar{h}_p &= [0,7748 \bar{h}_{N_2} + (0,2059 - 1,5625 \bar{\lambda}) \bar{h}_{O_2} + (0,0003 + \bar{\lambda}) \bar{h}_{CO_2} \\ &\quad + (0,019 + 1,125 \bar{\lambda}) \bar{h}_{H_2O}] \end{aligned} \quad (4.6)$$

, σε θερμοκρασία  $T_3$  [12].

Οι ενθαλπίες υπολογίζονται με βάση την σχέση (3.4).

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (4.2), (4.3) και (4.4) προκύπτει ο λόγος  $\bar{\lambda}$  ως:

$$\bar{\lambda} = \frac{0.7748\Delta\bar{h}_{N_2} + 0.2059\Delta\bar{h}_{O_2} + 0.0003\Delta\bar{h}_{CO_2} + 0.019\Delta\bar{h}_{H_2O}}{\bar{h}_f - 0.02\bar{LHV} - n_{th}\bar{LHV} - (\bar{h}_{CO_2} - 1.5625\bar{h}_{O_2} + 1.125\bar{h}_{H_2O})} \quad (4.7)$$

, με τις ενθαλπίες στον παρονομαστή να υπολογίζονται για την θερμοκρασία  $T_3$  [12]. Για την  $T_3$ , επειδή ουσιαστικά είναι άγνωστη του προβλήματος, ορίζουμε μια σταθερά, την

$$K2 = \frac{\dot{m}_{gas} \sqrt{T_3}}{P_3} \quad (4.8)$$

όπου και η  $P_3$  υπολογίζεται μέσω μιας άλλης σταθεράς, της:

$$K1 = \frac{P_3}{P_5} \quad (4.9)$$

Εκτιμούμε μια τιμή για τις δύο σταθερές και μία τιμή για την  $T_3$  και με την μέθοδο Newton-Raphson επιλύουμε την εξίσωση (4.8), ώστε να βρούμε την πραγματική  $T_3$ . Με γνωστά το  $\bar{\lambda}$ , τα μοριακά βάρη αέρα και καυσίμου, καθώς και την παροχή του αέρα  $\dot{m}_a$ , από την σχέση (3.1) βρίσκεται η παροχή του καυσίμου  $\dot{m}_f$ , αλλά και η παροχή των καυσαερίων ως  $\dot{m}_p = \dot{m}_a + \dot{m}_f$ .

Τέλος, η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον Στρόβιλο. Με γνωστή την  $P_3$  και την  $P_4$  ως παράμετρο, δηλαδή γνωστό τον λόγο εκτόνωσης του Στροβίλου, υπολογίζουμε την απόδοση αυτού, από τον χάρτη του. Ύστερα χρησιμοποιώντας την ισεντροπική εκτόνωση ως:

$$\begin{aligned} \bar{s}_{4s} - \bar{s}_3 &= x_{N_2} [\bar{s}^0(T_{4s}) - \bar{s}^0(T_3) - \bar{R} \ln \frac{P_3}{P_4}]_{N_2} \\ &+ x_{O_2} [\bar{s}^0(T_{4s}) - \bar{s}^0(T_3) - \bar{R} \ln \frac{P_3}{P_4}]_{O_2} \\ &+ x_{CO_2} [\bar{s}^0(T_{4s}) - \bar{s}^0(T_3) - \bar{R} \ln \frac{P_3}{P_4}]_{CO_2} \\ &+ x_{H_2O} [\bar{s}^0(T_{4s}) - \bar{s}^0(T_3) - \bar{R} \ln \frac{P_3}{P_4}]_{H_2O} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

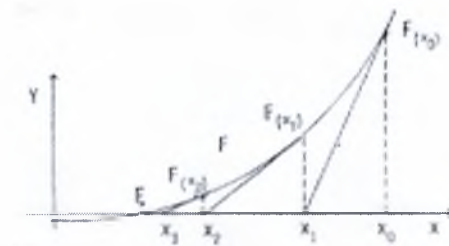
υπολογίζουμε την  $T_{4s}$  και επομένως την  $\bar{h}_{4s}$  και από την σχέση (3.8) υπολογίζεται η πραγματική ενθαλπία 4  $\bar{h}_4$  και με Newton-Raphson η πραγματική  $T_4$ .

Η όλη διαδικασία ελέγχεται από το ισοζύγιο ενέργειας στον στροβιλοσυμπιεστή, εξίσωση (3.6), στο οποίο αναζητούμε με Newton-Raphson την τιμή του λόγου συμπίεσης που ικανοποιεί το ισοζύγιο, αφού όλες οι μεταβλητές εξαρτώνται έμμεσα ή άμεσα από αυτόν.

#### 4.1.1 Η Επαναληπτική Μέθοδος Newton-Raphson

Στο σημείο αυτό θεωρήσαμε σκόπιμο να αναφερθούμε στο πως εκτελείται η μέθοδος Newton-Raphson για την επίλυση είτε μιας εξίσωσης, είτε ενός συστήματος εξισώσεων. Πρόκειται για μία από της πιο σημαντικές μεθόδους της Αριθμητικής Ανάλυσης για τον υπολογισμό ριζών. Η μέθοδος δημιουργεί μία ακολουθία, η οποία, εάν συγκλίνει, τότε θα συγκλίνει στη ρίζα μιας συνάρτησης  $f(x)$  [13].

Έστω ότι έχουμε μία συνάρτηση  $f(x)$  με γραφική παράσταση της μορφής του παρακάτω σχήματος:



#### Γραφική παράσταση τυχαίας συνάρτησης $f(x)$

Λαμβάνοντας αυθαίρετα ένα σημείο  $x_0$  του πεδίου ορισμού της συνάρτησης, φέρουμε την εφαπτομένη της καμπύλης στο  $(x_0, f_0)$ . Τότε η εξίσωση της εφαπτομένης ευθείας θα είναι η:

$$y - f(x_0) = f'(x_0)(x - x_0) \quad (4.11)$$



Από αυτή την εξίσωση, θέτοντας,  $y = 0$  και λύνοντάς την ως προς  $x$  μπορούμε να δούμε ότι το σημείο τομής  $x_1$ , της εφαπτομένης ευθείας με τον άξονα των τετμημένων, προκύπτει από την σχέση:

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (4.12)$$

Με εντελώς ανάλογο τρόπο διαπιστώνουμε, ότι η εφαπτομένη ευθεία από το σημείο  $(x_1, f_1)$  τέμνει τον άξονα των τετμημένων στο  $x_2$ , όπου:

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad (4.13)$$

Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία υπολογισμού σημείων τομής με άξονα τετμημένων, από εφαπτόμενες ευθείες, δημιουργούμε μία ακολουθία τιμών  $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots$ , που συγκλίνει σε μία ρίζα [13].

Επαγωγικά συμπεραίνουμε ότι ο τυχαίος όρος της ακολουθίας  $x_{n+1}$  προκύπτει με την βοήθεια της σχέσης:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (4.14)$$

Το κριτήριο διακοπής της επαναληπτικής διαδικασίας είναι το:

$$\left| \frac{x_{n+1} - x_n}{x_{n+1}} \right| \leq error$$

όπου, το error είναι το σφάλμα και πρέπει να είναι τάξης μεγέθους  $10^{-3}$  και κάτω.

Στην περίπτωση εκείνη που δεν είναι γνωστός ο αναλυτικός τύπος της συνάρτησης  $f$ , οπότε και δεν γνωρίζουμε τον αναλυτικό τύπο της  $f'$ , τότε υπολογίζουμε την παράγωγο σε ένα σημείο  $x_0$  από την σχέση:

$$f'(x_0) = \frac{f(x_0) - f(x'_0)}{x_0 - x'_0} \quad (4.15)$$

όπου, το σημείο  $x'_0$  είναι πολύ κοντά στο  $x_0$ .

## 4.2 Περιγραφή του Υπολογιστικού Κώδικα

### 4.2.1 Τα Κύρια Σημεία του Κώδικα

Ο πηγαίος κώδικας «GAS TURBOCHARGER INTEGRATION SYSTEM» είναι ένα πρόγραμμα γραμμένο σε γλώσσα Fortran, που έχει ως στόχο τόσο να προσομοιώσει, αλλά και να προσαρμόσει δεδομένα από πειραματικές μετρήσεις στον δεδομένο κύκλο, ώστε να υπολογισθούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια οι ζητούμενες παράμετροι του προβλήματος. Ο κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Γ, καθώς και όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για την κατανόηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται από αυτόν.

Το πρόγραμμα ξεκινά δίνοντας ορισμένες μεταβλητές. Πρώτα απ' όλα δίνεται η ακρίβεια του κώδικα, η οποία αφορά το σφάλμα των επαναληπτικών διαδικασιών και δεν πρέπει να είναι μικρότερη της τάξης του  $10^{-3}$ . Επίσης δίνεται το βήμα υπολογισμού των παραγώγων, το οποίο κρίθηκε να έχει τιμή ίδιας τάξης μεγέθους με την ακρίβεια της διαδικασίας. Στη συνέχεια, ο χρήστης του προγράμματος έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ανάμεσα σε τέσσερις τρόπους εκτέλεσης του προγράμματος, ανάλογα με τα δεδομένα που διαθέτει, ως εξής:

- 1) Προσομοίωση του κύκλου με εκτίμηση του λόγου συμπίεσης και προσαρμογή της πίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου του κινητήρα σε τιμές που προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις.
- 2) Προσομοίωση του κύκλου με εκτίμηση του λόγου συμπίεσης.
- 3) Προσομοίωση του κύκλου με εκτίμηση του λόγου συμπίεσης και προσαρμογή της πίεσης εξόδου από τον κινητήρα σε τιμές προερχόμενες από πειραματικές μετρήσεις.
- 4) Προσομοίωση του κύκλου με εκτίμηση του λόγου συμπίεσης και προσαρμογή της θερμοκρασίας εξόδου από τον κινητήρα σε τιμές προερχόμενες από πειραματικές μετρήσεις.

Ακόμα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει έναν άλλο συμπίεστή, έχοντας σαν βάση τον χάρτη του συμπίεστή που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα. Μπορεί, δηλαδή, να μετατοπίσει τις χαρακτηριστικές δίνοντας έναν συντελεστή κλίμακος (Scale Factor).

Ακολούθως, εισάγεται η θερμική απόδοση του κινητήρα Diesel, που κυμαίνεται από 0,30 έως 0,40. Έπειτα, δίνουμε τις επιθυμητές στροφές του συμπιεστή και μία εκτίμηση του λόγου συμπίεσης, για τις δεδομένες στροφές. Έπειτα εισάγουμε την αποτελεσματικότητα του ψύκτη και τέλος τις πειραματικές τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας εξόδου από τον κινητήρα, στην περίπτωση που έχουμε τις επιλογές 1, 3 και 4. Έτσι, έχουμε ολοκληρώσει την εισαγωγή των παραμέτρων που είναι απαραίτητες για την επίλυση του αριθμητικού μοντέλου με τη βοήθεια του κώδικα.

Ανάλογα με την επιλογή μας (1, 2, 3 ή 4) καλούνται, αντίστοιχα, οι υπορουτίνες SIMULATION1, SIMULATION2, SIMULATION3 ή SIMULATION4. Κάθε μία από αυτές εκτελεί μία Newton-Raphson, σε ανάλογες εξισώσεις, και καλεί μία σειρά άλλων υπορουτίνων, όπως περιγράφεται παρακάτω:

### **- Subroutine SIMULATION1**

Επιλύεται ένα σύστημα τριών εξισώσεων με την μέθοδο Newton-Raphson. Οι εξισώσεις είναι το ισοζύγιο ενέργειας του στροβίλοσυμπιεστή (εξίσωση (3.6)) και οι εξισώσεις:

$$K_1 = P_3 - P_{3,experimental} \quad (4.16)$$

$$K_2 = T_3 - T_{3,experimental} \quad (4.17)$$

όπου, οι τιμές των  $P_3$  και  $T_3$  υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη από την υπορουτίνα TEST, ενώ και όλες οι άλλες παράμετροι (θερμοκρασίες, παροχές μάζας κτλ.) υπολογίζονται από την ίδια υπορουτίνα ως συνάρτηση του λόγου συμπίεσης. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν επιτευχθεί η δοθείσα ακρίβεια, οπότε και καλείται η υπορουτίνα RESULTS, η οποία τυπώνει στην οθόνη και αποθηκεύει τα αποτελέσματα στο αρχείο APOTELASMATA.TXT.

### **- Subroutine SIMULATION2**

Επιλύεται η εξίσωση (3.6) με τη μέθοδο Newton-Raphson, με παραμέτρους που υπολογίζονται από την υπορουτίνα TEST και καλείται η υπορουτίνα RESULTS, όταν επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια.

### **- Subroutine SIMULATION3**

Επιλύεται ένα σύστημα δύο εξισώσεων με την μέθοδο Newton-Raphson. Οι εξισώσεις είναι το ισοζύγιο ενέργειας του στροβιλοσυμπιεστή (εξίσωση (3.6)) και η εξίσωση (4.16). Και πάλι, όλες οι απαραίτητες παράμετροι για την επίλυση του συστήματος υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη από την υπορουτίνα TEST και καλείται η υπορουτίνα RESULTS, όταν επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια.

### **- Subroutine SIMULATION4**

Επιλύεται ένα σύστημα δύο εξισώσεων με την μέθοδο Newton-Raphson. Οι εξισώσεις είναι το ισοζύγιο ενέργειας του στροβιλοσυμπιεστή (εξίσωση (3.6)) και η εξίσωση (4.17). Και πάλι, όλες οι απαραίτητες παράμετροι για την επίλυση του συστήματος υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη από την υπορουτίνα TEST και καλείται η υπορουτίνα RESULTS, όταν επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια.

## **4.2.2 Η Υπορουτίνα TEST**

Η υπορουτίνα TEST είναι η κυριότερη υπορουτίνα του κώδικα και αυτό γιατί υπολογίζει:

1. Τις πιέσεις, τις θερμοκρασίες, τις ενθαλπίες και τις εντροπίες σε όλα τα σημεία του κύκλου.
2. Τις παροχές μάζας του αέρα εισόδου στον συμπιεστή, του καυσίμου, των καυσαερίων και τον λόγο καυσίμου-αέρα  $\bar{\lambda}$ .

3. Την σύσταση των καυσαερίων.
4. Την πραγματική απόδοση του στροβίλου και του συμπιεστή, αλλά και τους πραγματικούς λόγους συμπίεσης και εκτόνωσης.
5. Τις πραγματικές τιμές των σταθερών  $K_1$  και  $K_2$ , στις εξισώσεις (4.16), (4.17).

Όλες οι παραπάνω παράμετροι υπολογίζονται με βάση την ανάλυση του αριθμητικού μοντέλου, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Δηλαδή:

- Ανοίγεται το αρχείο DEDOMENA.TXT, το οποίο περιέχει κατά σειρά την σύσταση, το μοριακό βάρος, την πίεση και την θερμοκρασία εισόδου του αέρα στον συμπιεστή καθώς και την τιμή της παγκόσμιας σταθεράς των ιδανικών αερίων, τις τιμές των συντελεστών για τις εξισώσεις (4.2) και (3.4), τις εκτιμήσεις των θερμοκρασιών  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_{4,is}$  και  $T_4$ , το μοριακό βάρος, την θερμογόνο δύναμη και την ενθαλπία σχηματισμού του καυσίμου, και τέλος τους χάρτες του συμπιεστή και του στροβίλου.
- Με δεδομένες τις στροφές και τον λόγο συμπίεσης του συμπιεστή καλείται η υπορουτίνα CSHEP2, η οποία με τη σειρά της καλεί τις υπορουτίνες CS2VAL, STORE2, GETNP2, SETUP2, GIVENS και ROTATE, για να υπολογίσει με παρεμβολή την παροχή και την απόδοση του συμπιεστή, ενώ ταυτόχρονα υπολογίζονται και η ενθαλπία και η εντροπία στην θέση 1 από τις σχέσεις (3.4), (4.2).
- Υπολογίζονται η πίεση εξόδου από τον συμπιεστή και από τις εξισώσεις (4.1) και (4.2), με την μέθοδο Newton-Raphson (υπορουτίνα NRA), βρίσκεται η ισεντροπική θερμοκρασία στη θέση 2. Στη συνέχεια, υπολογίζεται με την υπορουτίνα ENTH η ισεντροπική ενθαλπία στην ίδια θέση και από την σχέση (3.7) βρίσκουμε την πραγματική ενθαλπία στη θέση 2. Καλούμε την RN και υπολογίζουμε την πραγματική θερμοκρασία στη θέση 2 και με την ENTR βρίσκεται η πραγματική εντροπία στην ίδια θέση.
- Από την σχέση (3.9) και με δεδομένη την αποτελεσματικότητα του ψύκτη βρίσκουμε την ενθαλπία στην θέση 5 και καλώντας την RN βρίσκεται η θερμοκρασία εκεί. Καλείται η ENTR και υπολογίζεται η εντροπία στη θέση 5. Τέλος, θεωρούμε πτώση πίεσης 98%.

- Χρησιμοποιούμε την σχέση (4.9) και καλούμε την υπορουτίνα CHECKT3Mf. Η υπορουτίνα αυτή υπολογίζει την σύσταση των καυσαερίων, τον λόγο καυσίμου-αέρα, την παροχή των καυσαερίων, την παροχή του καυσίμου και την θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από τον κινητήρα, καλώντας την υπορουτίνα SYSTASHL, που επιλύει την εξίσωση (4.7), και εφαρμόζοντας την Newton-Raphson στην εξίσωση (4.8). Τέλος, υπολογίζεται η εντροπία στην θέση 3 από την υπορουτίνα ENTR.
- Επιλέγοντας την πίεση εξόδου των καυσαερίων από τον στρόβιλο ίση με την ατμοσφαιρική καθορίζουμε πλήρως τον λόγο εκτόνωσης  $\frac{P_3}{P_4}$  και εκτελώντας μια διαδικασία παρόμοια με τον συμπίεστή, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.9), (4.2), βρίσκουμε την ισεντροπική θερμοκρασία στην θέση 4, με τη βοήθεια της υπορουτίνας NRA και με την ENTH την ισεντροπική ενθαλπία. Καλούμε τις υπορουτίνες SPLINE και SEVAL και κάνουμε παρεμβολή στον χάρτη του στρόβιλου, ώστε να υπολογίσουμε την απόδοσή του. Χρησιμοποιούμε την σχέση (3.8) και βρίσκουμε την πραγματική ενθαλπία στη θέση 4 και καλώντας την RN βρίσκουμε την πραγματική θερμοκρασία  $T_4$ . Τέλος, καλούμε την ENTR για να υπολογίσουμε την εντροπία στη θέση 4.

Στο σημείο αυτό έχουν πλήρως καθοριστεί όλες οι επιμέρους παράμετροι που απαιτούνται από τις υπορουτίνες SIMULATION1, SIMULATION2, SIMULATION3 και SIMULATION4, καθώς και για την υπορουτίνα RESULTS.



## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 5.1 Περιγραφή της Παραμετρικής Μελέτης

Ο πηγαίος κώδικας «Gas Turbocharger Integration System», που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, εκτελέστηκε και με τους τέσσερις τρόπους, δηλαδή εκτελέστηκαν οι υπορουτίνες SIMULATION1, SIMULATION2, SIMULATION3 και SIMULATION4, ώστε να δούμε πως συμπεριφέρεται το σύστημα σε όλες τις περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση δόθηκαν οι απαραίτητες παράμετροι για την εκτέλεση του κώδικα και οι οποίες παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες, κατά σειρά εκτέλεσης του κώδικα.

**Πίνακας 1 – Παράμετροι εισαγωγής για την υπορουτίνα SIMULATION2**

<b>SIMULATION2 (<math>\epsilon=0.8, n_{th}=0.35</math>)</b>			
<b><math>n/n_0</math></b>	<b>PRC</b>	<b><math>T_{πειρ}</math></b>	<b><math>P_{πειρ}</math></b>
0.50	1,52		
0.60	1,78		
0.70	2,10		
0.80	2,60		
0.90	3,10		
1.00	3,80		
1.06	4,10		

**Πίνακας 2 – Παράμετροι εισαγωγής για την υπορουτίνα SIMULATION3**

<b>SIMULATION3 (<math>\varepsilon=0.8, n_{th}=0.35</math>)</b>			
<b><math>n/n_0</math></b>	<b>PRC</b>	<b><math>T_{πειρ}</math></b>	<b><math>P_{πειρ}</math></b>
0.50	1,52		1,55
0.60	1,78		1,75
0.70	2,10		2,10
0.80	2,60		2,50
0.90	3,10		3,00
1.00	3,80		3,30
1.06	4,10		3,70

**Πίνακας 3 – Παράμετροι εισαγωγής για την υπορουτίνα SIMULATION4**

<b>SIMULATION4 (<math>\varepsilon=0.8, n_{th}=0.35</math>)</b>			
<b><math>n/n_0</math></b>	<b>PRC</b>	<b><math>T_{πειρ}</math></b>	<b><math>P_{πειρ}</math></b>
0.50	1,52	540	
0.60	1,78	560	
0.70	2,10	580	
0.80	2,60	620	
0.90	3,10	660	
1.00	3,80	730	
1.06	4,10	780	

**Πίνακας 4 – Παράμετροι εισαγωγής για την υπορουτίνα SIMULATION1**

<b>SIMULATION1 (<math>\varepsilon=0.8, n_{th}=0.35</math>)</b>			
<b><math>n/n_0</math></b>	<b>PRC</b>	<b><math>T_{πειρ}</math></b>	<b><math>P_{πειρ}</math></b>
0.50	1,52	540	1,55
0.60	1,78	560	1,75
0.70	2,10	580	2,10
0.80	2,60	620	2,50
0.90	3,10	660	3,00
1.00	3,80	730	3,30
1.06	4,10	780	3,70

Η ακρίβεια που χρησιμοποιήθηκε ήταν της τάξης του  $10^{-4}$ , οι θερμοκρασίες σε Kelvin, οι πιέσεις σε bar, ενώ για τον υπολογισμό των παραγώγων χρησιμοποιήθηκε βήμα της ίδιας τάξης.

Εκτός αυτής της γενικής περίπτωσης, εξετάστηκε και εκείνη στην οποία αλλάζει ο θερμικός βαθμός απόδοσης  $\eta_{th}$  του κινητήρα, με την βοήθεια της υπορουτίνας SIMULATION1. Συγκεκριμένα ερευνήθηκαν οι περιπτώσεις με  $\eta_{th} = 0.30$  και  $\eta_{th} = 0.40$ , ώστε να εντοπίσουμε τυχόν σημαντική εξάρτηση του συστήματος από τον βαθμό απόδοσης της μηχανής. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν δίδονται στον ακόλουθο πίνακα, η εκτέλεση των υπορουτίνων έγινε με την ίδια σειρά, ενώ η ακρίβεια της διαδικασίας και το βήμα υπολογισμού των παραγώγων διατηρήθηκε.

**Πίνακας 5 – Παράμετροι εισαγωγής για την υπορουτίνα SIMULATION1,  $\eta_{th}=0.30$**

<b>SIMULATION1 (<math>\epsilon=0.8, n_{th}=0.30</math>)</b>			
<b><math>n/n_0</math></b>	<b>PRC</b>	<b><math>T_{πειρ}</math></b>	<b><math>P_{πειρ}</math></b>
0.50	1,52	530	1,52
0.60	1,78	550	1,75
0.70	2,22	570	2,19
0.80	2,60	610	2,50
0.90	3,10	650	3,00
1.00	3,70	720	3,30
1.06	4,00	780	3,70

**Πίνακας 6 – Παράμετροι εισαγωγής για την υπορουτίνα SIMULATION1,  $\eta_{th}=0.40$**

<b>SIMULATION1 (<math>\epsilon=0.8, \eta_{th}=0.40</math>)</b>			
<b>n/n<sub>0</sub></b>	<b>PRC</b>	<b>T<sub>πειρ</sub></b>	<b>P<sub>πειρ</sub></b>
0.50	1,53	525	1,56
0.60	1,78	560	1,75
0.70	2,20	580	2,00
0.80	2,70	640	2,40
0.90	3,10	650	3,00
1.00	3,70	730	3,30
1.06	4,00	780	3,70

## 5.2 Παρουσίαση και Συζήτηση των Αποτελεσμάτων

Από την παραπάνω παραμετρική μελέτη προέκυψαν αποτελέσματα, τα οποία παρατίθενται σε μορφή πινάκων στο Παράρτημα Α.

### 5.2.1 Εκτέλεση SIMULATION1

Από την εκτέλεση της υπορουτίνας SIMULATION1, για αποτελεσματικότητα ψύκτη  $\epsilon = 0.80$  και θερμική απόδοση κινητήρα  $\eta_{th} = 0.35$  προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα Α1. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται όλες οι θερμοδυναμικές παράμετροι που αφορούν το σύστημα, όπως πιέσεις, αποδόσεις, παροχές, θερμοκρασίες, ενθαλπίες και άλλα, συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του άξονα του στροβίλοσυμπιεστή. Παρατηρείται αύξηση του λόγου συμπίεσης και εκτόνωσης του συμπιεστή και του στροβίλου, αντίστοιχα, ενώ η απόδοση του στροβίλου παρουσιάζει μέγιστο στο ίδιο πεδίο στροφών που παρουσιάζει μέγιστο η απόδοση του συμπιεστή. Επίσης, παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τον συμπιεστή και τον κινητήρα, ενώ στη σύσταση των καυσαερίων παρουσιάζεται μείωση των ποσοστών του αζώτου και του οξυγόνου με ταυτόχρονη αύξηση των ποσών διοξειδίου του άνθρακα και των υδρατμών.

### 5.2.2 Εκτέλεση SIMULATION2

Από την εκτέλεση της υπορουτίνας SIMULATION2, η οποία αποτελεί το πιο απλό μοντέλο που διερευνήθηκε, για αποτελεσματικότητα ψύκτη  $\varepsilon = 0.80$  και θερμική απόδοση κινητήρα  $\eta_{th} = 0.35$  προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα Α2. Από την εκτέλεση αυτή εξάγονται όμοια συμπεράσματα με την περίπτωση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2.1.

### 5.2.3 Εκτέλεση SIMULATION3

Από την εκτέλεση της υπορουτίνας SIMULATION3, για αποτελεσματικότητα ψύκτη  $\varepsilon = 0.80$  και θερμική απόδοση κινητήρα  $\eta_{th} = 0.35$  προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα Α3. Από την εκτέλεση αυτή εξάγονται, επίσης, όμοια συμπεράσματα με την περίπτωση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2.1, εμφανίζονται όμως ορισμένες ανωμαλίες και πιο απότομες μεταβολές των τιμών που προέκυψαν από το μοντέλο αυτό.

### 5.2.4 Εκτέλεση SIMULATION4

Από την εκτέλεση της υπορουτίνας SIMULATION4, για αποτελεσματικότητα ψύκτη  $\varepsilon = 0.80$  και θερμική απόδοση κινητήρα  $\eta_{th} = 0.35$  προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα Α4. Από την εκτέλεση αυτή εξάγονται, επίσης, όμοια συμπεράσματα με την περίπτωση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2.1.

## 5.3 Σύγκριση των Αποτελεσμάτων

Παρατηρούμε από τους πίνακες των αποτελεσμάτων, πως υπάρχει μια αντιστοιχία στον τρόπο που λειτουργεί το σύστημα, εκτός της περίπτωσης όπου προσομοιώνουμε τον λόγο συμπίεσης και προσαρμόζουμε την πίεση εξόδου από τον κινητήρα σε πειραματικές μετρήσεις, δηλαδή την εκτέλεση της υπορουτίνας SIMULATION3, όπου διακρίνουμε

ορισμένες ανωμαλίες στα παραγόμενα αποτελέσματα με την εμφάνιση απότομων αλλαγών. Η παρατήρηση αυτή φαίνεται καλύτερα από τις γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων και για τις τέσσερις υπορουτίνες. Σε γενικές γραμμές παρατηρούνται ενδεικτικά αύξηση των λόγων συμπίεσης και εκτόνωσης συμπίεστή και στροβίλου αντίστοιχα, οι αποδόσεις τους παρουσιάζουν μέγιστο στο ίδιο πεδίο στροφών του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή, τα καυσάερια έχουν την ίδια συμπεριφορά, δηλαδή μείωση του αζώτου  $N_2$  και του οξυγόνου  $O_2$  με ταυτόχρονη αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα  $CO_2$  και των υδρατμών  $H_2O$  και η θερμοκρασία παρουσιάζει αύξηση με την άνοδο των στροφών του στροβιλοσυμπιεστή.

Οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων και για τις τέσσερις υπορουτίνες παρατίθενται στο Παράρτημα Β (Σχήματα Β.1 ως Β.7.2). Οι γραφικές παραστάσεις αναπαριστούν την μεταβολή των διαφόρων παραμέτρων των πινάκων συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή.

## 5.4 Μεταβολή Θερμικού Βαθμού Απόδοσης Κινητήρα

Εκτός της γενικής περίπτωσης, εκτελέστηκε και εκείνη στην οποία ο θερμικός βαθμός απόδοσης του κινητήρα μεταβάλλεται. Συγκεκριμένα εκτελέστηκε η υπορουτίνα SIMULATION1 για αποτελεσματικότητα ψύκτη  $\varepsilon = 0.8$  και θερμικές αποδόσεις κινητήρα  $\eta_{th} = 0.30$  και  $\eta_{th} = 0.40$ . Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου παρατίθενται σε μορφή πινάκων στο Παράρτημα Α (Πίνακες Α.5 και Α.6), οι οποίοι περιέχουν τις ίδιες παραμέτρους συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή, με την γενική περίπτωση. Παρατηρείται μικρή εξάρτηση των θερμοδυναμικών παραμέτρων, όπως πίεση, θερμοκρασία, παροχές και αποδόσεις των επιμέρους στοιχείων, από την θερμική απόδοση του κινητήρα.

Στο Παράρτημα Β (Σχήματα Β.8 ως Β.14.2) παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων των Πινάκων Α.5 και Α.6 και γίνεται σύγκριση αυτών με την περίπτωση της θερμικής απόδοσης κινητήρα  $\eta_{th} = 0.35$ . Παρατηρούμε ότι οι γραφικές παραστάσεις έχουν την ίδια συμπεριφορά, με μόνες διαφοροποιήσεις για την απόδοση

του συμπιεστή, τον λόγο καυσίμου / αέρα, την σύσταση των καυσαερίων και τις θερμοκρασίες εξόδου των καυσαερίων από τον κινητήρα και τον συμπιεστή.



## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα

Από την παραμετρική μελέτη, που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 (εκτέλεση του πηγαίου κώδικα Fortran «*GASTIS - GAS Turbocharger Integration System*») για της προαναφερθείσες περιπτώσεις της Παραγράφου 5.2, προκύπτουν τα εξής:

1. Γραμμική αύξηση του λόγου συμπίεσης και εκτόνωσης του συμπιεστή και του στροβίλου, αντίστοιχα, συναρτήσει των στροφών του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή.
2. Οι αποδόσεις συμπιεστή και στροβίλου παρουσιάζουν μέγιστο. Στην περίπτωση, μάλιστα, που εκφράζει το μοντέλο SIMULATION1, παρουσιάζεται μέγιστο στις ίδιες στροφές του άξονα του στροβιλοσυμπιεστή.
3. Οι παροχές αέρα, καυσίμου και καυσαερίων έχουν αυξητικό ρυθμό, με της παροχές αέρα και καυσαερίων να συμπεριφέρονται κατά τρόπο παρόμοιο.
4. Τα καυσαέρια του κινητήρα εμφανίζουν την αναμενόμενη συμπεριφορά. Δηλαδή οι ποσότητες αζώτου και οξυγόνου παρουσιάζουν την ίδια πτωτική τάση, ενώ οι ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα και υδρατμών την ίδια αυξητική τάση.
5. Οι πιέσεις εξόδου του αέρα από τον συμπιεστή και των καυσαερίων από τον κινητήρα αυξάνονται γραμμικά με τις στροφές του στροβιλοσυμπιεστή.
6. Οι θερμοκρασίες των αερίων σε όλα τα σημεία του κύκλου έχουν τον αναμενόμενο αυξητικό ρυθμό, σε σχέση με τον λόγο  $\frac{n}{n_0}$ . Συγκεκριμένα, οι θερμοκρασίες εξόδου των αερίων από τον συμπιεστή και τον ψύκτη αυξάνονται γραμμικά και οι θερμοκρασίες εξόδου από τον κινητήρα και τον στροβίλο εκθετικά.

7. Η μεταβολή της θερμικής απόδοσης του κινητήρα Diesel επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την απόδοση του συμπιεστή, τον λόγο καυσίμου / αέρα, την σύσταση των καυσαερίων και της θερμοκρασίες εξόδου από τον κινητήρα και τον στρόβιλο.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ό,τι το μοντέλο που αναπτύχθηκε, ανταποκρίθηκε, σε γενικές γραμμές, ικανοποιητικά και έδωσε αποτελέσματα, τα οποία βρίσκονται εντός των συμβατών ορίων που προβλέπονται τόσο από της νόμους της θερμοδυναμικής και των μηχανών εσωτερικής καύσης, όσο και από της διεθνείς προδιαγραφές. Από την άλλη, εντοπίστηκαν και ορισμένες ατέλειες και αδυναμίες του κώδικα, οι οποίες εστιάζονται στην υπολογιστική ικανότητα του μοντέλου και συγκεκριμένα στις δυνατότητες εκτίμησης των σταθερών K1 και K2, αλλά και στην επαναληπτική επίλυση του ισοζυγίου ενέργειας στον στρόβιλοσυμπιεστή.

## 6.2 Προτάσεις

Από τα παραπάνω αποτελέσματα και διαπιστώσεις συνάγονται ορισμένες αδυναμίες του παρόντος μαθηματικού μοντέλου (πηγαίος κώδικας Fortran GASTIS). Πιο συγκεκριμένα:

1. Εντοπίζεται μια δυσκολία στην εκτέλεση της διπαραμετρικής παρεμβολής στο χάρτη του συμπιεστή για ορισμένες εκ των περιπτώσεων, καθώς και μία ανωμαλία στα παραγόμενα αποτελέσματα, που πιθανότατα οφείλεται στην ύπαρξη των δύο σταθερών K1 και K2, οι οποίες προσδίδουν στο σύστημα δύο βαθμούς ελευθερίας . Προτείνεται η διεύρυνση της παρούσης παραμετρικής μελέτης, ώστε να διαπιστωθεί με ασφάλεια η αδυναμία των υπομοντέλων που εκτελούν την διπαραμετρική παρεμβολή και την αντικατάσταση αυτών, στην περίπτωση που αποδειχθούν ανεπαρκής.
2. Για να επιτύχουμε την μείωση των βαθμών ελευθερίας του συστήματος, οι οποίοι εκτιμούν εμπειρικά την πίεση και την θερμοκρασία εξόδου από τον κινητήρα, συνιστάται η περαιτέρω μελέτη του προβλήματος. Συγκεκριμένα θα

πρέπει να εστιάσουμε την προσοχή μας στον κινητήρα Diesel, ώστε να επιτευχθεί ο ακριβής υπολογισμός της πίεσης και της θερμοκρασίας στην έξοδο του κινητήρα, με τη βοήθεια των απαραίτητων θερμοδυναμικών – μαθηματικών σχέσεων και ισοζυγίων.

3. Τέλος, προτείνουμε την εύρεση πιο κατάλληλου συνδυασμού κινητήρα Diesel και στροβιλοσυμπιεστή.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Y.A. Cengel και M.A. Boles, «Θερμοδυναμική για Μηχανικούς», 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 1998.
- [2] [www.holset.co.uk](http://www.holset.co.uk)
- [3] “Introduction to Turbochargers”, Schwitzer Turbochargers, Indianapolis, IN, ΗΠΑ, 1991.
- [4] Heywood, J.B., “Internal Combustion Engine Fundamentals”, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [5] “Turbocharging in China”, Turbo Magazine, ABB Turbo Systems Ltd, 2002.
- [6] Obert, E.F., “Internal Combustion Engines”, International Text Book, 1968.
- [7] [www.DieselNet.com](http://www.DieselNet.com) “Turbochargers for Diesel Engines”, DieselNet Technology Guide, Air Induction for Diesel Engines, July 2001
- [8] Foulkes, D.M., “Developing Light-Duty Diesel Engines for Low Emissions and High Fuel Economy”, Internal Report, Ford Motor Co., 1995.
- [9] Landis, F., “Diesel Engine”, Comptons Encyclopedia Online, V3.0, 1998.  
[http://www.comptons.com/encyclopedia/ARTICLES/0050/00540416\\_A.html](http://www.comptons.com/encyclopedia/ARTICLES/0050/00540416_A.html)
- [10] Blair, G.P., “Design and Simulation of Two-Stroke Engines”, The Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, ΗΠΑ, 1996.
- [11] Schindler, K-P., “Why do we need Diesel?”, SAE paper no. 972684, 1997.
- [12] Σταμάτης, Α., «Σχεδιασμός Ενεργειακών Συστημάτων», Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2002.
- [13] Κυταγιάς Δ. και Βρυζίδης Λ., «Αριθμητική Ανάλυση», Εκδόσεις Ίων, 1991.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α – Πίνακες Αποτελεσμάτων**

Πίνακας Α.1

Results	n/n <sub>0</sub>						
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,06
PRC	1,5071	1,7793	2,1377	2,6505	3,0879	3,7275	3,9502
PRT	1,5170	1,7267	2,0660	2,4654	2,9497	3,2583	3,6517
n <sub>com</sub>	0,7899	0,8044	0,8050	0,8010	0,7694	0,7514	0,7040
n <sub>turb</sub>	0,8040	0,8148	0,8291	0,8361	0,8345	0,8255	0,8019
m <sub>air</sub>	1,3768	1,6972	2,1181	2,6548	3,1873	3,5438	3,6761
m <sub>fuel</sub>	0,0097	0,0143	0,0194	0,0279	0,0367	0,0511	0,0596
m <sub>gas</sub>	1,3865	1,7115	2,1375	2,6827	3,2241	3,5950	3,7358
L	0,0141	0,0169	0,0184	0,0211	0,0232	0,0290	0,0326
N <sub>2</sub>	76,3976	76,1881	76,0767	75,8728	75,7231	75,2946	75,0315
O <sub>2</sub>	18,1196	17,6414	17,3873	16,9218	16,5800	15,6022	15,0016
CO <sub>2</sub>	1,4265	1,6968	1,8405	2,1036	2,2968	2,8496	3,1891
H <sub>2</sub> O	3,4449	3,7441	3,9030	4,1941	4,4079	5,0194	5,3950
P <sub>1</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
P <sub>2</sub>	1,5268	1,8026	2,1675	2,6872	3,1305	3,7756	4,0020
P <sub>5</sub>	1,4962	1,7665	2,1241	2,6335	3,0679	3,7001	3,9219
P <sub>3</sub>	1,5367	1,7492	2,0928	2,4974	2,9880	3,3006	3,6991
P <sub>4</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
T <sub>1</sub>	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15
T <sub>2</sub>	345,12	364,20	387,14	415,79	442,24	473,98	495,15
T <sub>5</sub>	307,65	311,56	316,29	322,24	327,76	334,42	338,87
T <sub>3</sub>	511,31	552,77	577,01	618,64	650,00	730,60	779,79
T <sub>4</sub>	467,87	491,91	493,33	509,28	516,05	571,85	602,93
H <sub>1</sub>	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63
H <sub>2</sub>	-3348,21	-2783,37	-2098,26	-1234,23	-429,29	544,44	1197,92
H <sub>5</sub>	-4441,34	-4328,38	-4191,35	-4018,55	-3857,56	-3662,81	-3532,12
H <sub>3</sub>	-7518,60	-8003,31	-8185,45	-8596,77	-8865,95	-9897,95	-10522,20
H <sub>4</sub>	-8866,53	-9907,52	-10811,79	-12051,83	-13115,23	-15003,68	-16252,75
S <sub>1</sub>	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35
S <sub>2</sub>	198,60	200,19	202,02	204,17	206,05	208,17	209,52
S <sub>5</sub>	195,25	195,61	196,05	196,59	197,09	197,67	198,06
S <sub>3</sub>	209,31	211,52	212,75	214,75	216,17	219,49	221,34
S <sub>4</sub>	206,56	207,87	207,84	208,60	208,85	211,61	213,01

Πίνακας Α.2

Results	n/n <sub>0</sub>						
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,06
PRC	1,5353	1,7794	2,0559	2,5942	3,0948	3,7338	4,1663
PRT	1,5046	1,7263	1,9747	2,4407	2,8812	3,2931	3,6338
n <sub>com</sub>	0,7987	0,8042	0,7946	0,7900	0,7732	0,7534	0,7399
n <sub>turb</sub>	0,8037	0,8148	0,8265	0,8361	0,8353	0,8237	0,8033
m <sub>air</sub>	1,3027	1,6983	2,0703	2,6774	3,1688	3,5381	3,6381
m <sub>fuel</sub>	0,0104	0,0142	0,0187	0,0272	0,0365	0,0505	0,0587
m <sub>gas</sub>	1,3132	1,7126	2,0891	2,7047	3,2054	3,5887	3,6968
L	0,0161	0,0168	0,0182	0,0204	0,0232	0,0287	0,0324
N <sub>2</sub>	76,2476	76,1946	76,0948	75,9247	75,7223	75,3171	75,0450
O <sub>2</sub>	17,7772	17,6562	17,4284	17,0404	16,5783	15,6534	15,0325
CO <sub>2</sub>	1,6201	1,6884	1,8172	2,0366	2,2978	2,8207	3,1717
H <sub>2</sub> O	3,6591	3,7348	3,8772	4,1200	4,4089	4,9874	5,3757
P <sub>1</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
P <sub>2</sub>	1,5553	1,8025	2,0828	2,6280	3,1350	3,7822	4,2204
P <sub>5</sub>	1,5242	1,7664	2,0412	2,5754	3,0723	3,7065	4,1360
P <sub>3</sub>	1,5242	1,7488	2,0003	2,4724	2,9187	3,3359	3,6811
P <sub>4</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
T <sub>1</sub>	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15
T <sub>2</sub>	346,81	364,21	383,17	414,35	441,76	473,80	494,40
T <sub>5</sub>	308,00	311,56	315,47	321,94	327,66	334,38	338,72
T <sub>3</sub>	538,82	551,60	573,04	609,16	650,04	726,69	777,34
T <sub>4</sub>	494,20	490,88	494,89	502,36	518,52	567,81	601,22
H <sub>1</sub>	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63
H <sub>2</sub>	-3298,41	-2783,17	-2217,21	-1277,72	-444,07	538,87	1174,80
H <sub>5</sub>	-4431,38	-4328,34	-4215,15	-4027,25	-3860,52	-3663,93	-3536,74
H <sub>3</sub>	-7935,41	-7984,76	-8157,49	-8457,28	-8870,96	-9835,11	-10488,09
H <sub>4</sub>	-9329,31	-9884,14	-10609,48	-11825,18	-13044,38	-14940,99	-16192,47
S <sub>1</sub>	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35
S <sub>2</sub>	198,74	200,19	201,71	204,06	206,01	208,16	209,47
S <sub>5</sub>	195,28	195,61	195,97	196,56	197,08	197,67	198,05
S <sub>3</sub>	210,78	211,46	212,56	214,31	216,17	219,33	221,25
S <sub>4</sub>	208,08	207,82	207,96	208,23	209,00	211,41	212,93



Πίνακας Α.3

Results	n/n <sub>0</sub>						
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,06
PRC	1,5147	1,7793	2,8935	2,5756	2,9264	4,1395	4,0591
PRT	1,5293	1,7267	2,0731	2,4586	2,9328	3,2584	3,6515
n <sub>com</sub>	0,7926	0,8043	0,8437	0,7816	0,7332	0,7977	0,7227
n <sub>turb</sub>	0,8044	0,8148	0,8294	0,8361	0,8350	0,8255	0,8019
m <sub>air</sub>	1,3656	1,6975	1,8626	2,7059	3,2421	3,4352	3,6546
m <sub>fuel</sub>	0,0094	0,0142	0,0304	0,0271	0,0366	0,0525	0,0590
m <sub>gas</sub>	1,3750	1,7118	1,8930	2,7330	3,2788	3,4877	3,7137
L	0,0139	0,0169	0,0328	0,0201	0,0227	0,0307	0,0324
N <sub>2</sub>	76,4177	76,1906	75,0156	75,9462	75,7578	75,1695	75,0426
O <sub>2</sub>	18,1654	17,6472	14,9654	17,0893	16,6593	15,3166	15,0270
CO <sub>2</sub>	1,4006	1,6935	3,2096	2,0089	2,2520	3,0111	3,1747
H <sub>2</sub> O	3,4163	3,7404	5,4177	4,0893	4,3583	5,1980	5,3791
P <sub>1</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
P <sub>2</sub>	1,5345	1,8025	2,9311	2,6089	2,9666	4,1929	4,1123
P <sub>5</sub>	1,5038	1,7665	2,8725	2,5567	2,9073	4,1090	4,0300
P <sub>3</sub>	1,5492	1,7491	2,1000	2,4906	2,9709	3,3008	3,6990
P <sub>4</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
T <sub>1</sub>	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15
T <sub>2</sub>	345,57	364,21	421,20	414,58	441,06	479,60	494,65
T <sub>5</sub>	307,74	311,56	323,37	321,99	327,51	335,60	338,77
T <sub>3</sub>	507,74	552,31	769,12	605,39	643,66	753,24	777,79
T <sub>4</sub>	463,75	491,50	660,65	498,40	511,42	590,10	601,34
H <sub>1</sub>	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63
H <sub>2</sub>	-3335,04	-2783,31	-1070,22	-1270,94	-465,56	717,58	1182,59
H <sub>5</sub>	-4438,71	-4328,36	-3985,75	-4025,89	-3864,82	-3628,19	-3535,18
H <sub>3</sub>	-7458,97	-7996,06	-11006,75	-8394,84	-8774,03	-10221,45	-10493,39
H <sub>4</sub>	-8822,66	-9898,63	-14534,96	-11765,85	-12964,34	-15488,37	-16208,86
S <sub>1</sub>	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35
S <sub>2</sub>	198,64	200,19	204,56	204,08	205,96	208,54	209,49
S <sub>5</sub>	195,26	195,61	196,69	196,57	197,06	197,78	198,05
S <sub>3</sub>	209,12	211,50	220,87	214,14	215,89	220,35	221,26
S <sub>4</sub>	206,31	207,85	215,92	208,01	208,61	212,47	212,93

Πίνακας Α.4

Results	n/n <sub>0</sub>						
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,06
PRC	1,5341	1,7793	2,1435	2,6088	3,0947	3,7252	4,1365
PRT	1,5034	1,7264	2,0585	2,4554	2,8813	3,2859	3,6082
n <sub>com</sub>	0,7989	0,8043	0,8081	0,7908	0,7732	0,7509	0,7353
n <sub>turb</sub>	0,8036	0,8148	0,8289	0,8361	0,8353	0,8241	0,8056
m <sub>air</sub>	1,3160	1,6979	2,0959	2,6857	3,1685	3,5454	3,6422
m <sub>fuel</sub>	0,0105	0,0142	0,0184	0,0276	0,0366	0,0509	0,0590
m <sub>gas</sub>	1,3265	1,7122	2,1143	2,7134	3,2251	3,5963	3,7012
L	0,0161	0,0169	0,0176	0,0207	0,0232	0,0288	0,0325
N <sub>2</sub>	76,2479	76,1916	76,1353	75,9062	75,7194	75,3040	75,0340
O <sub>2</sub>	17,7778	17,6495	17,5209	16,9981	16,5718	15,6236	15,0072
CO <sub>2</sub>	1,6197	1,6922	1,7649	2,0605	2,3015	2,8375	3,1859
H <sub>2</sub> O	3,6587	3,7390	3,8194	4,1464	4,4130	5,0060	5,3915
P <sub>1</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
P <sub>2</sub>	1,5541	1,8025	2,1713	2,6439	3,1351	3,7740	4,1907
P <sub>5</sub>	1,5230	1,7665	2,1278	2,5910	3,0724	3,6985	4,1069
P <sub>3</sub>	1,5235	1,7488	2,0832	2,4874	2,9188	3,3286	3,6551
P <sub>4</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
T <sub>1</sub>	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15
T <sub>2</sub>	346,71	364,21	387,03	415,05	441,75	474,04	494,72
T <sub>5</sub>	307,97	311,56	316,27	322,09	327,66	334,43	338,72
T <sub>3</sub>	538,75	552,13	566,50	612,58	650,54	728,99	779,24
T <sub>4</sub>	494,22	491,36	484,57	504,60	518,93	569,84	603,06
H <sub>1</sub>	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63
H <sub>2</sub>	-3301,57	-2783,24	-2101,67	-1256,56	-444,29	546,00	1175,71
H <sub>5</sub>	-4432,02	-4328,35	-4192,04	-4023,01	-3860,56	-3662,50	-3536,56
H <sub>3</sub>	-7935,20	-7993,16	-8019,41	-8505,85	-8879,17	-9870,92	-10519,48
H <sub>4</sub>	-9326,33	-9894,46	-10584,87	-11913,09	-13055,96	-14987,54	-16227,62
S <sub>1</sub>	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35
S <sub>2</sub>	198,73	200,19	202,01	204,12	206,01	208,18	209,48
S <sub>5</sub>	195,28	195,61	196,05	196,58	197,08	197,67	198,05
S <sub>3</sub>	210,78	211,49	212,24	214,47	216,19	219,42	221,32
S <sub>4</sub>	208,09	207,84	207,35	208,35	209,02	211,51	213,02

Πίνακας Α.5

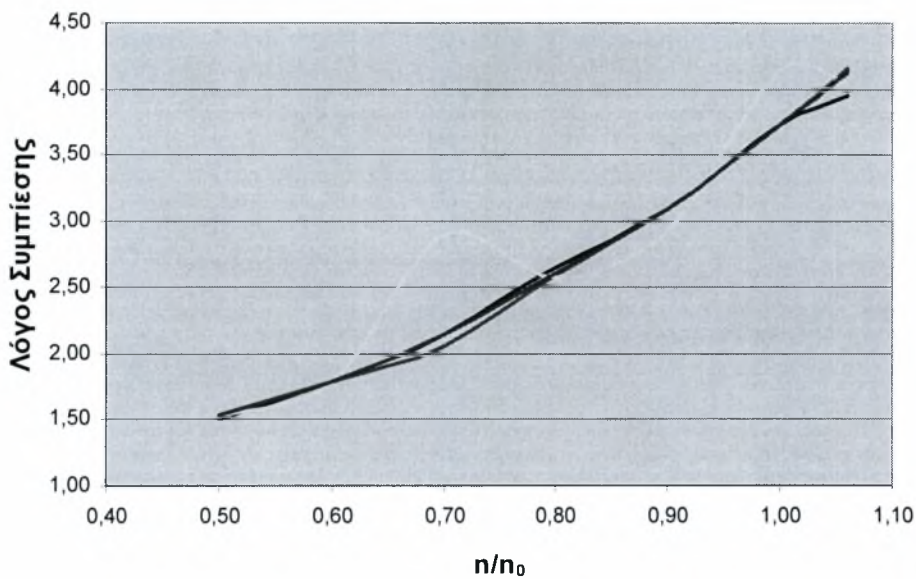
Results	n/n <sub>0</sub>						
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,06
PRC	1,5157	1,7794	2,1395	2,7152	3,0835	3,7225	4,0280
PRT	1,5209	1,7263	2,0724	2,4009	2,9581	3,3026	3,7269
n <sub>com</sub>	0,7941	0,8044	0,8051	0,8134	0,7637	0,7490	0,7198
n <sub>turb</sub>	0,8041	0,8148	0,8294	0,8362	0,8343	0,8232	0,7982
m <sub>air</sub>	1,3574	1,6972	2,1176	2,5401	3,2160	3,5514	3,6550
m <sub>fuel</sub>	0,0096	0,0142	0,0183	0,0283	0,0360	0,0498	0,0577
m <sub>gas</sub>	1,3670	1,7114	2,1359	2,5684	3,2521	3,6013	3,7127
L	0,0142	0,0168	0,0173	0,0224	0,0225	0,0282	0,0317
N <sub>2</sub>	76,3917	76,1978	76,1558	75,7771	75,7721	75,3530	75,0955
O <sub>2</sub>	18,1061	17,6635	17,5677	16,7035	16,6919	15,7355	15,1476
CO <sub>2</sub>	1,4341	1,6843	1,7385	2,2270	2,2335	2,7742	3,1066
H <sub>2</sub> O	3,4534	3,7302	3,7901	4,3307	4,3379	4,9360	5,3037
P <sub>1</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
P <sub>2</sub>	1,5354	1,8026	2,1675	2,7512	3,1235	3,7680	4,0815
P <sub>5</sub>	1,5047	1,7665	2,1242	2,6962	3,0611	3,6927	3,9998
P <sub>3</sub>	1,5407	1,7492	2,0994	2,4321	2,9965	3,3456	3,7754
P <sub>4</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
T <sub>1</sub>	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15
T <sub>2</sub>	345,55	364,20	387,14	417,16	442,95	474,23	494,17
T <sub>5</sub>	307,74	311,56	316,29	322,53	327,91	334,47	338,67
T <sub>3</sub>	513,46	552,18	564,03	637,32	643,01	722,39	770,70
T <sub>4</sub>	469,60	491,37	481,67	527,97	510,08	564,11	594,15
H <sub>1</sub>	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63
H <sub>2</sub>	-3335,57	-2783,37	-2098,34	-1192,60	-407,69	551,87	1167,65
H <sub>5</sub>	-4438,82	-4328,38	-4191,37	-4010,22	-3853,24	-3661,33	-3538,17
H <sub>3</sub>	-7502,04	-7939,25	-7922,82	-8812,74	-8673,45	-9669,50	-10277,72
H <sub>4</sub>	-8863,67	-9841,40	-10500,04	-12281,00	-12844,53	-14752,08	-15988,89
S <sub>1</sub>	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35
S <sub>2</sub>	198,64	200,19	202,02	204,27	206,10	208,19	209,46
S <sub>5</sub>	195,26	195,61	196,05	196,62	197,10	197,68	198,04
S <sub>3</sub>	209,44	211,50	212,12	215,59	215,87	219,18	221,02
S <sub>4</sub>	206,66	207,85	207,18	209,62	208,54	211,24	212,61

Πίνακας Α.6

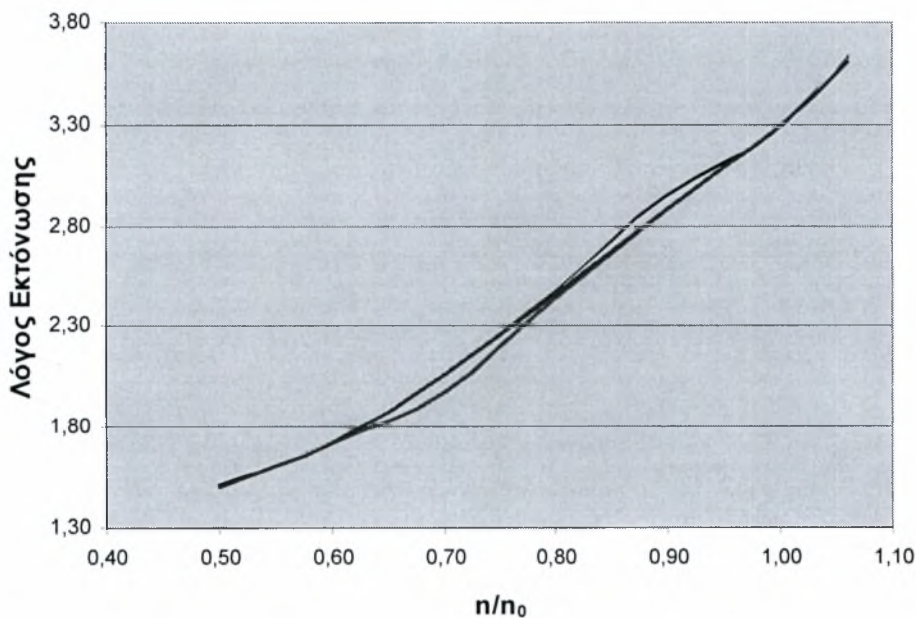
Results	n/n <sub>0</sub>						
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,06
PRC	1,4996	1,7793	2,2090	2,6600	3,2403	3,7304	3,9784
PRT	1,5321	1,7267	1,9749	2,3683	2,9637	3,2679	3,6425
n <sub>com</sub>	0,7834	0,8044	0,8175	0,8057	0,7940	0,7515	0,7142
n <sub>turb</sub>	0,8045	0,8148	0,8265	0,8362	0,8341	0,8250	0,8025
m <sub>air</sub>	1,4035	1,6972	1,9332	2,6050	3,1288	3,5436	3,6588
m <sub>fuel</sub>	0,0092	0,0143	0,0204	0,0291	0,0360	0,0506	0,0597
m <sub>gas</sub>	1,4128	1,7116	2,1155	2,6342	3,1648	3,5942	3,7186
L	0,0133	0,0170	0,0213	0,0224	0,0231	0,0287	0,0328
N <sub>2</sub>	76,4626	76,1818	75,8636	75,7772	75,7277	75,3166	75,0160
O <sub>2</sub>	18,2679	17,6271	16,9007	16,7036	16,5906	15,6522	14,9662
CO <sub>2</sub>	1,3426	1,7049	2,1155	2,2270	2,2908	2,8213	3,2091
H <sub>2</sub> O	3,3522	3,7530	4,2073	4,3306	4,4012	4,9881	5,4172
P <sub>1</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
P <sub>2</sub>	1,5192	1,8026	2,2375	2,6948	3,2821	3,7759	4,0340
P <sub>5</sub>	1,4888	1,7665	2,1927	2,6409	3,2165	3,7004	3,9533
P <sub>3</sub>	1,5520	1,7492	2,0005	2,3991	3,0022	3,3103	3,6899
P <sub>4</sub>	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130	1,0130
T <sub>1</sub>	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15	298,15
T <sub>2</sub>	344,91	364,20	389,81	415,49	444,59	473,98	493,73
T <sub>5</sub>	307,61	311,56	316,85	322,18	328,25	334,42	338,57
T <sub>3</sub>	498,51	552,73	614,03	633,98	648,07	724,92	780,06
T <sub>4</sub>	455,04	491,87	530,94	526,67	514,03	567,03	603,31
H <sub>1</sub>	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63	-4714,63
H <sub>2</sub>	-3354,49	-2783,37	-2018,10	-1243,32	-357,72	544,19	1153,97
H <sub>5</sub>	-4442,60	-4328,38	-4175,32	-4020,37	-3843,25	-3662,86	-3540,91
H <sub>3</sub>	-7364,05	-8057,99	-8822,40	-8919,21	-8888,49	-9896,94	-10645,02
H <sub>4</sub>	-8708,39	-9962,07	-11452,05	-12321,47	-13138,96	-14970,04	-16372,97
S <sub>1</sub>	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35	194,35
S <sub>2</sub>	198,58	200,19	202,22	204,15	206,21	208,17	209,43
S <sub>5</sub>	195,24	195,61	196,10	196,58	197,13	197,67	198,04
S <sub>3</sub>	208,59	211,51	214,50	215,43	216,08	219,25	221,33
S <sub>4</sub>	205,77	207,86	209,90	209,55	208,73	211,37	213,01

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Γραφικές Παραστάσεις Αποτελεσμάτων**

### Λόγος Συμπίεσης vs Στροφές Υπερπληρωτή

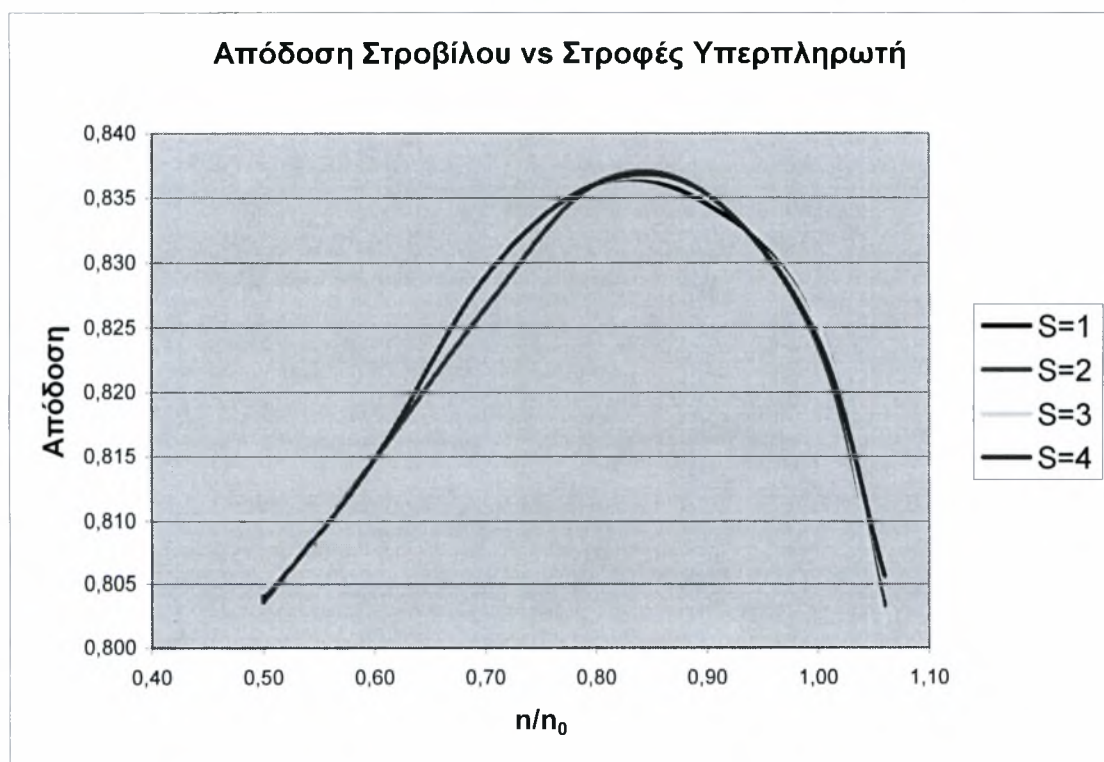
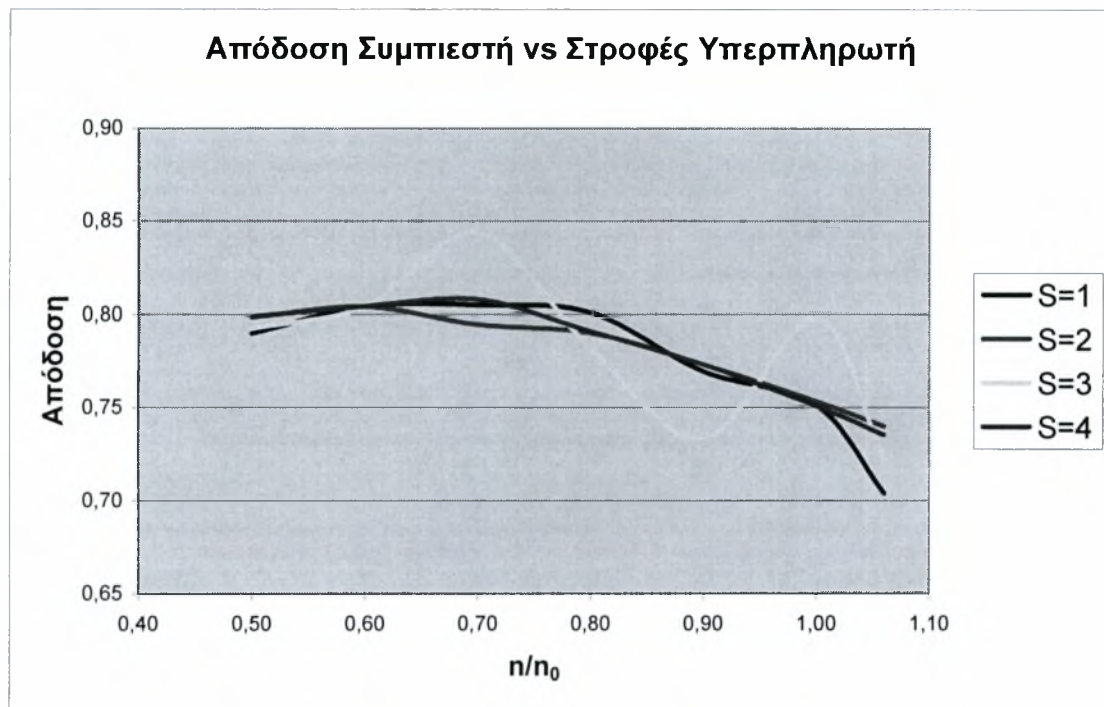


### Λόγος Εκτόνωσης vs Στροφές Υπερπληρωτή



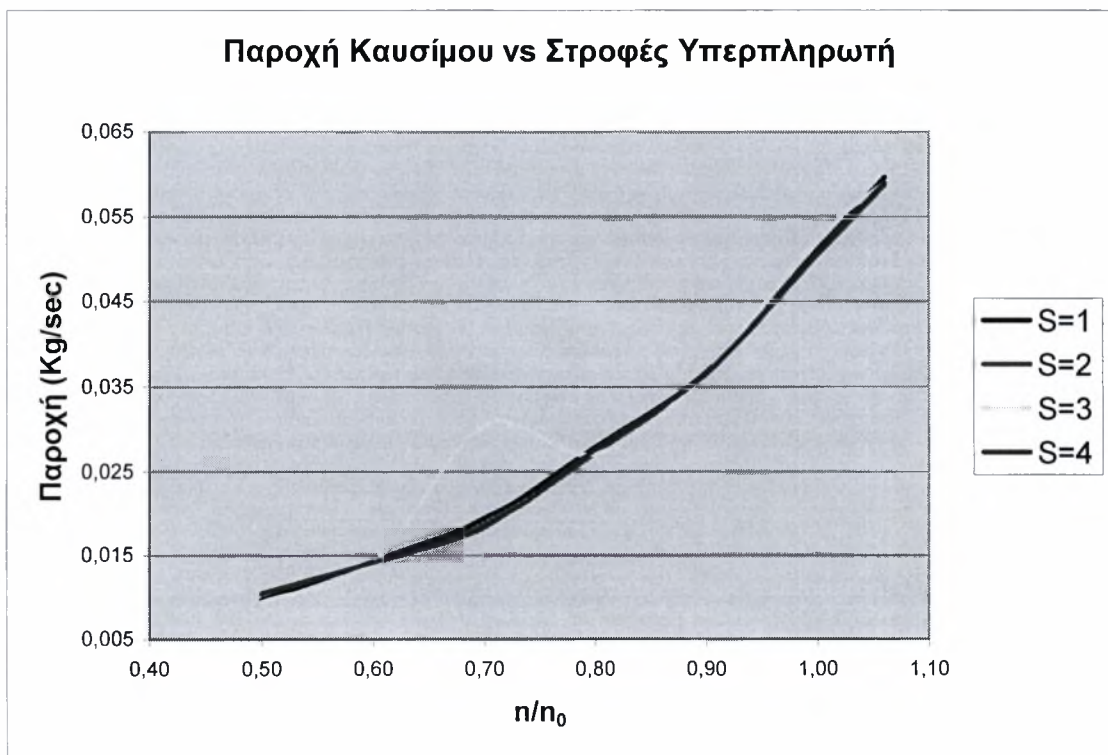
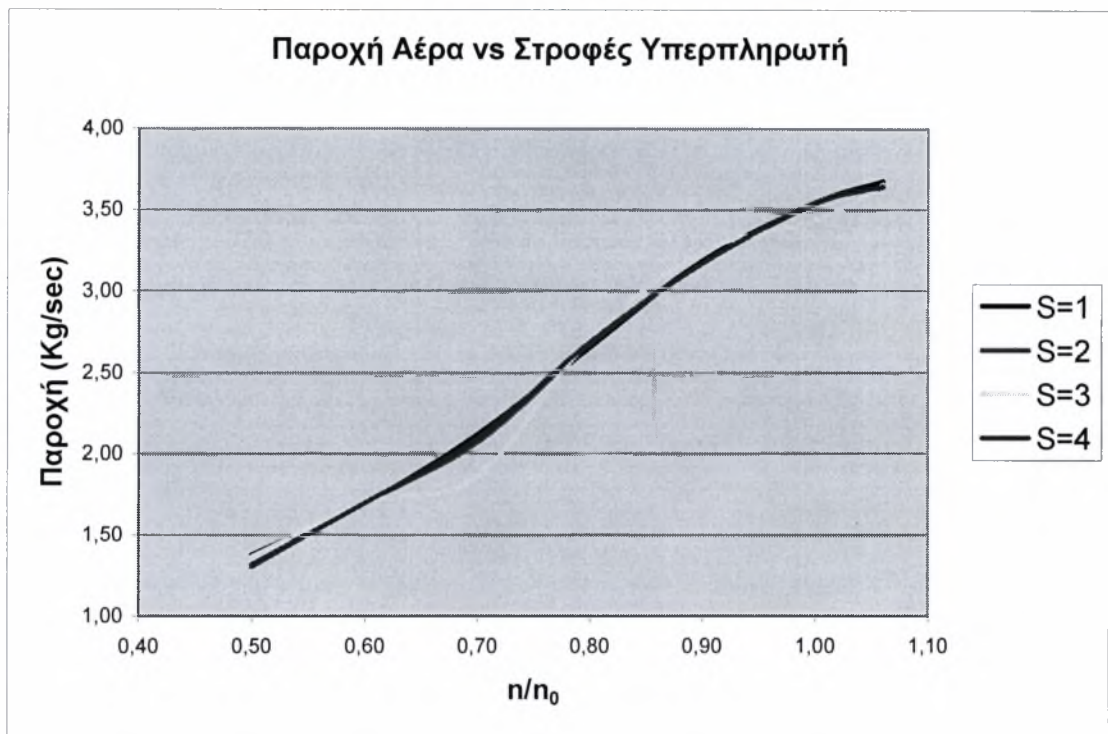
**Σχήμα Β.1 – Μεταβολή λόγου συμπίεσης & εκτόνωσης έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή**



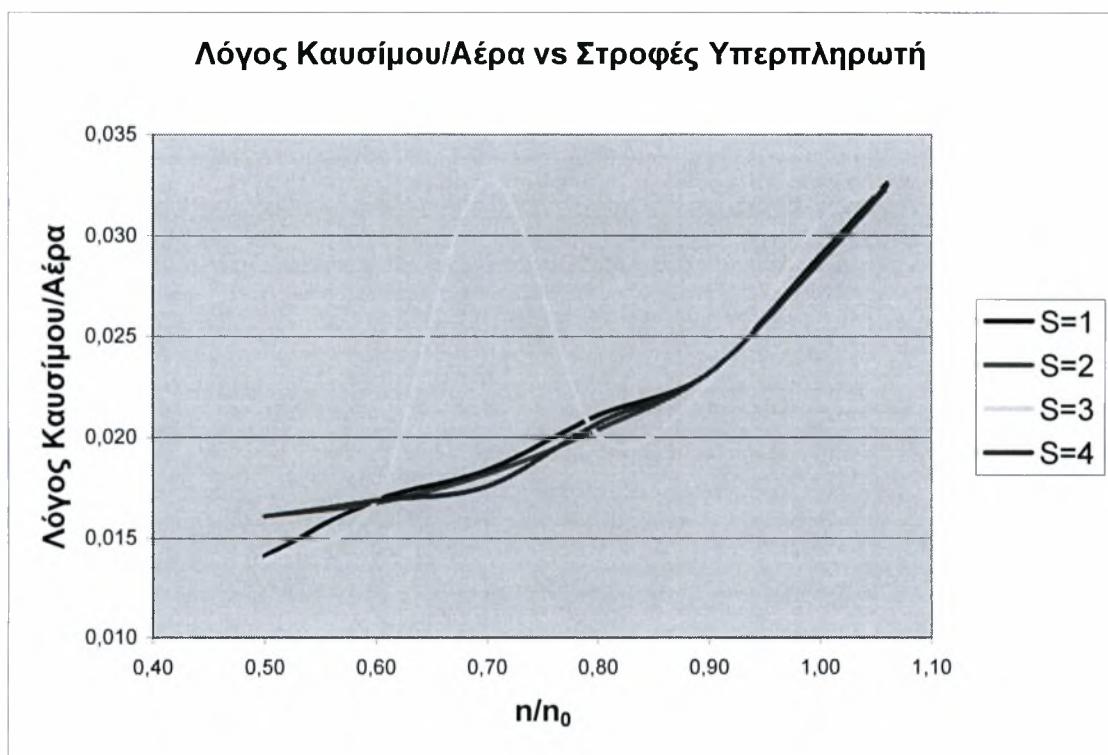
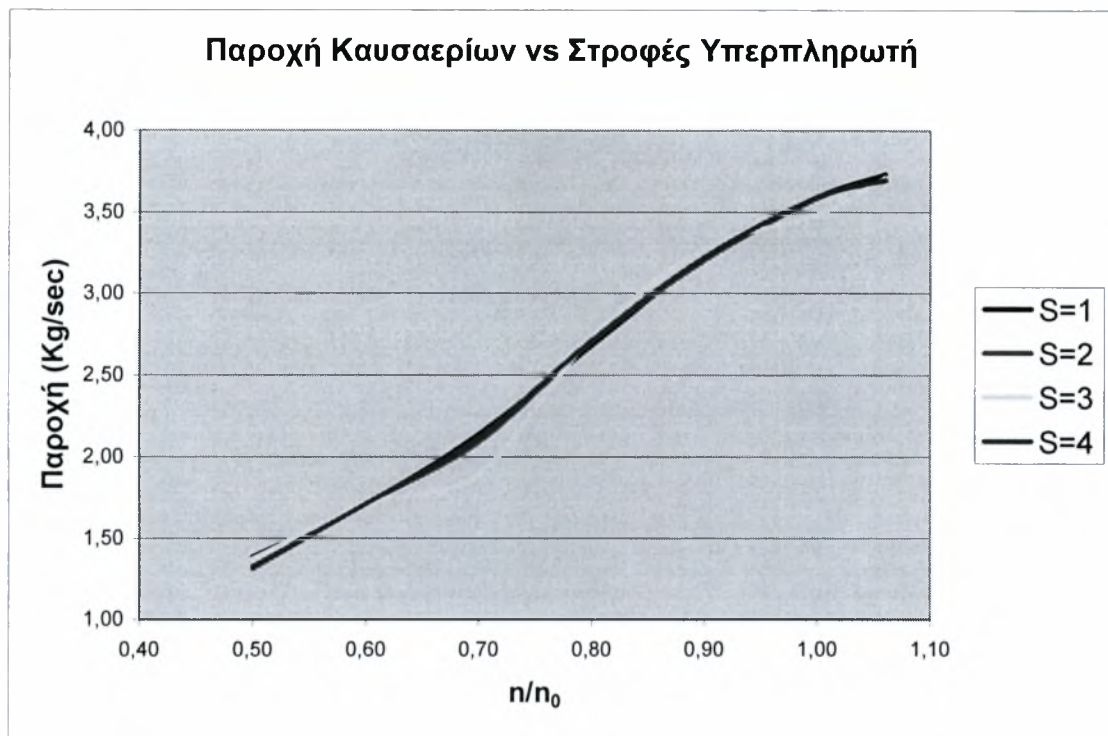


**Σχήμα Β.2 – Μεταβολή απόδοσης συμπίεστη & στροβίλου έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπίεστη**



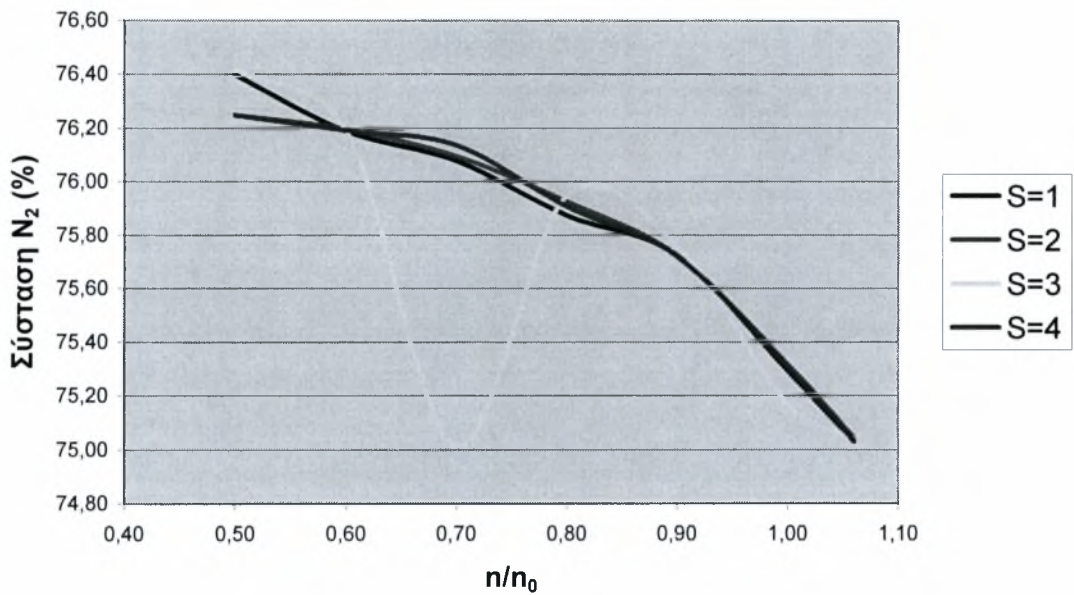


**Σχήμα Β.3 – Μεταβολή παροχών αέρα & καυσίμου έναντι στροφών άξονα  
στροβιλοσυμπιεστή**

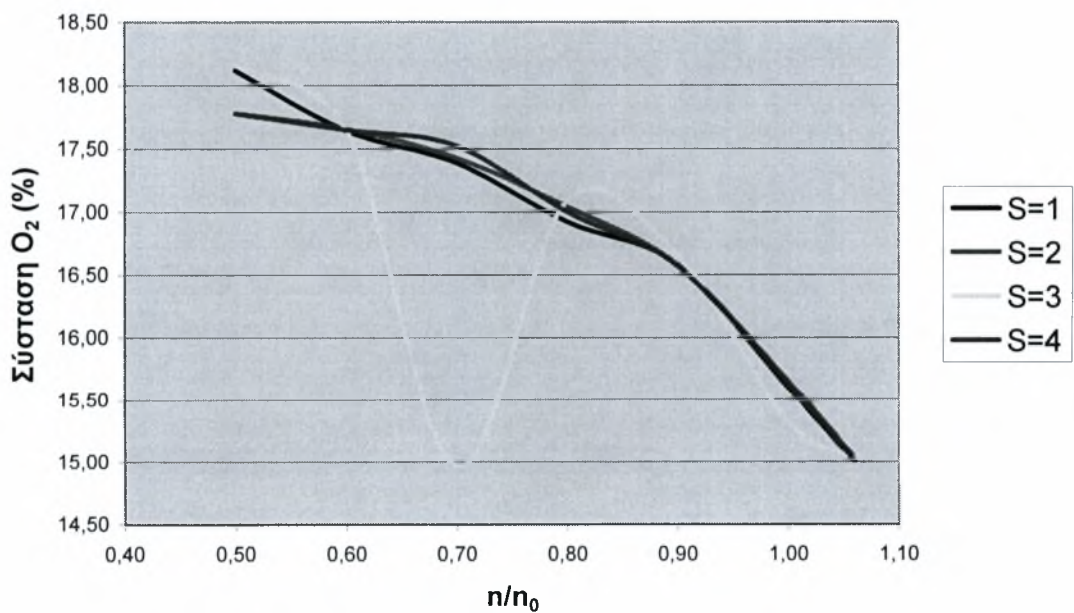


**Σχήμα Β.4 – Μεταβολή παροχής καυσαερίων & λόγου καυσίμου / αέρα έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή**

### Ποσοστιαία Σύσταση $N_2$ vs Στροφές Υπερπληρωτή

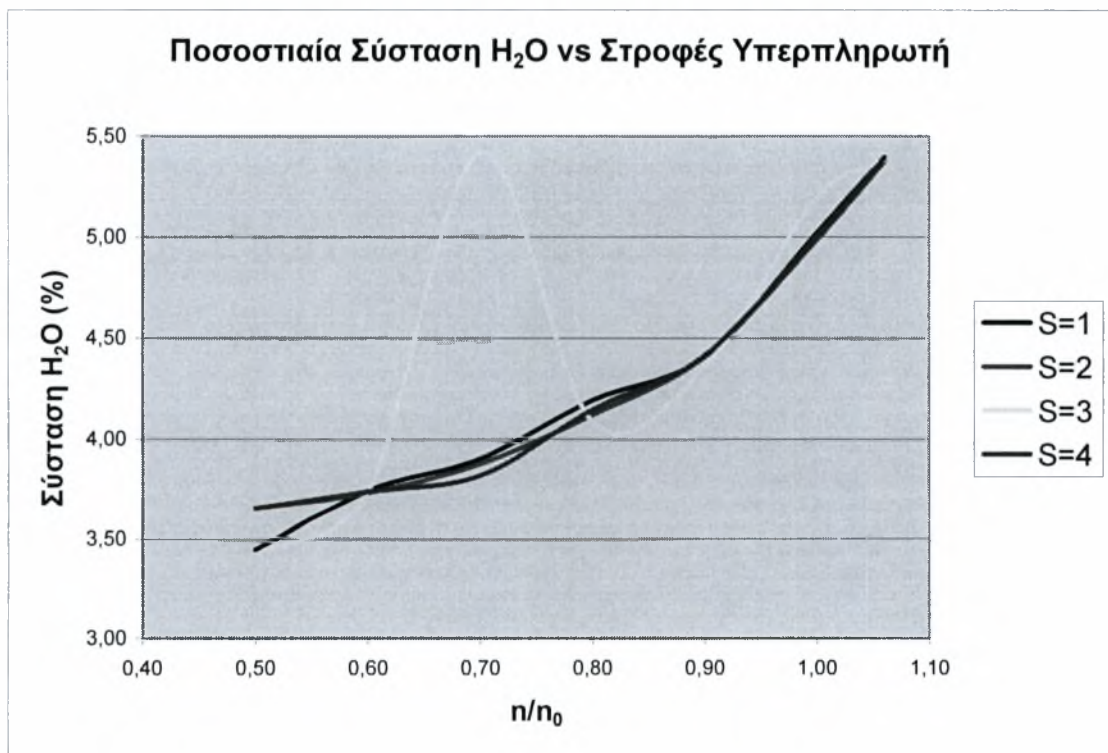
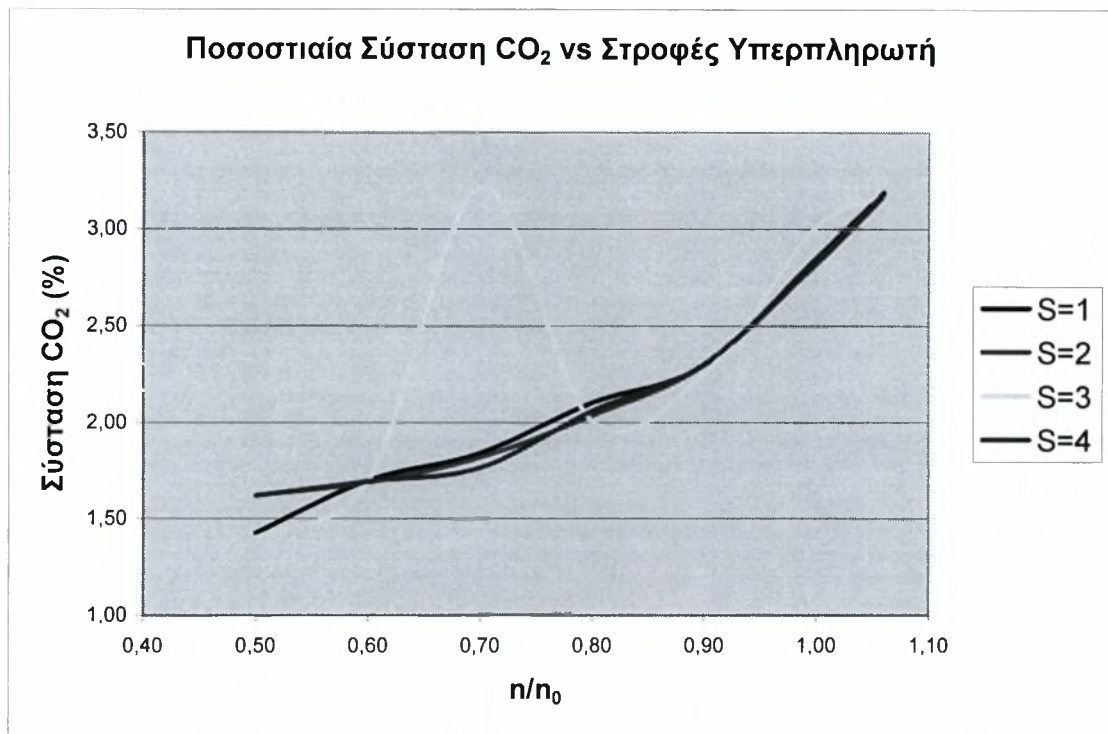


### Ποσοστιαία Σύσταση $O_2$ vs Στροφές Υπερπληρωτή

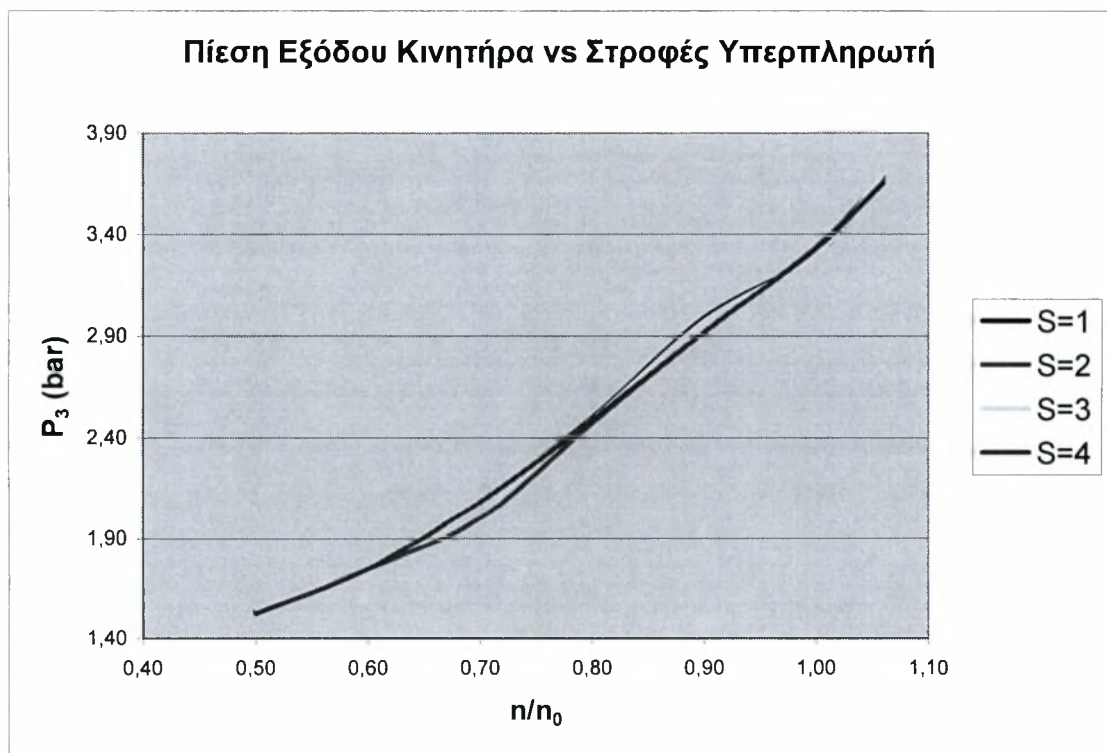
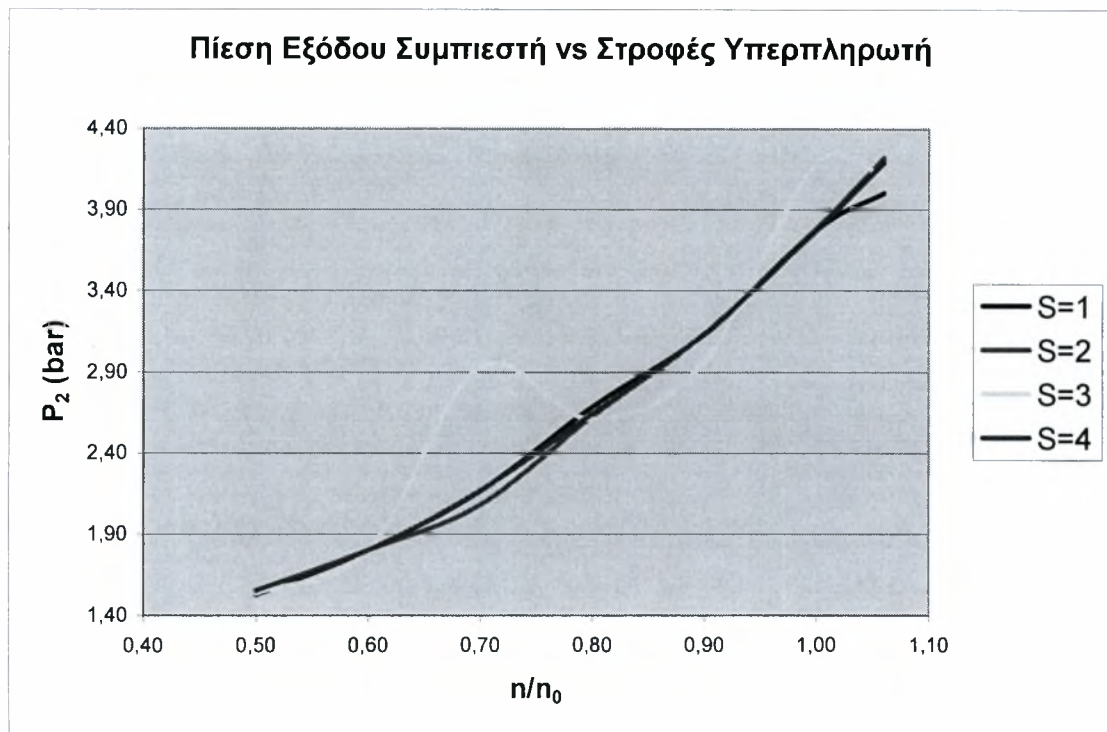


**Σχήμα B.5.1 – Μεταβολή σύστασης καυσαερίων έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή**

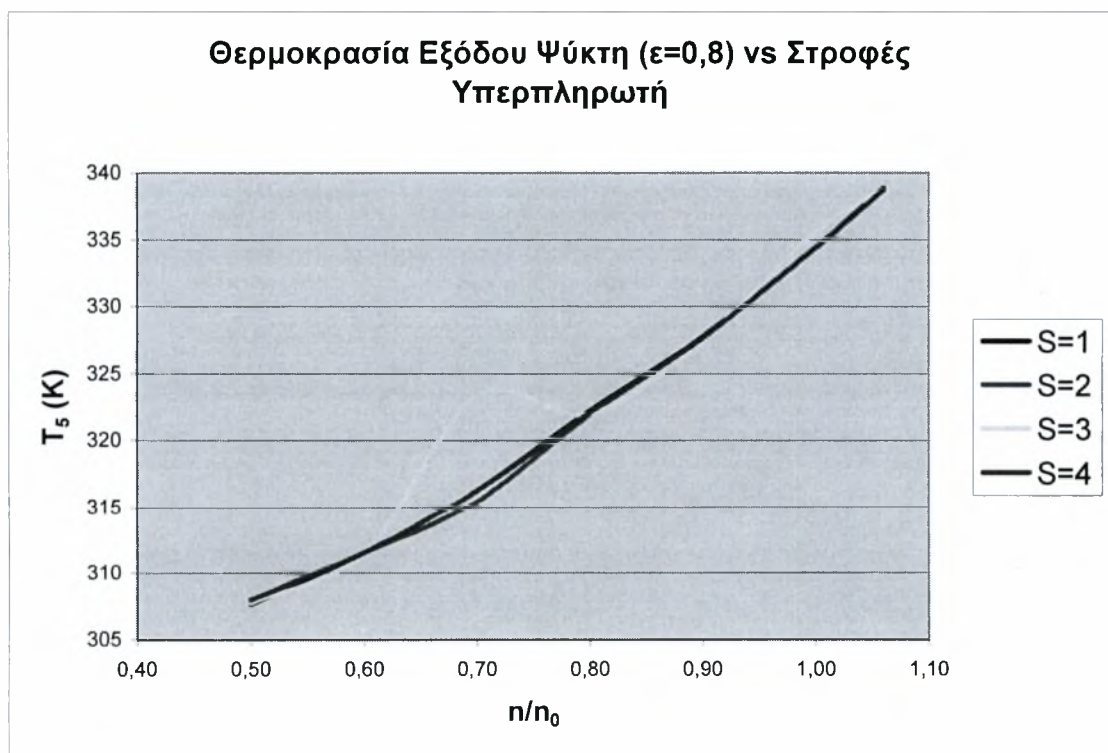
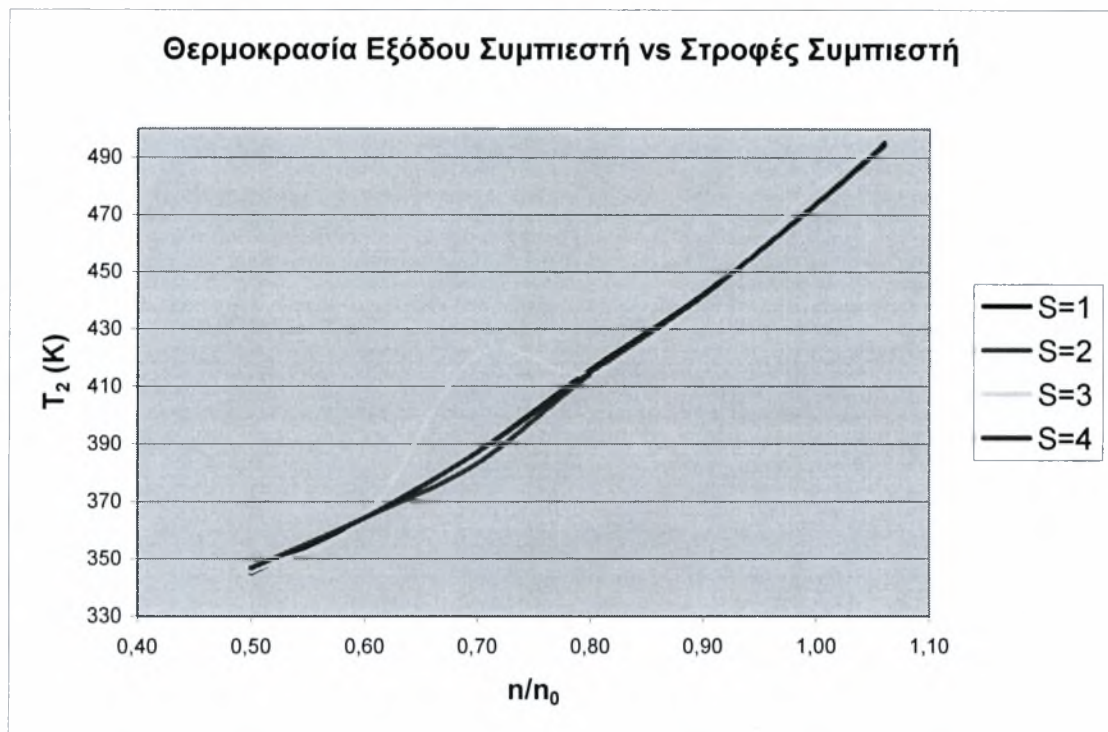




**Σχήμα B.5.2 – Μεταβολή σύστασης καυσαερίων έναντι στροφών άξονα  
στροβιλοσυμπιεστή**

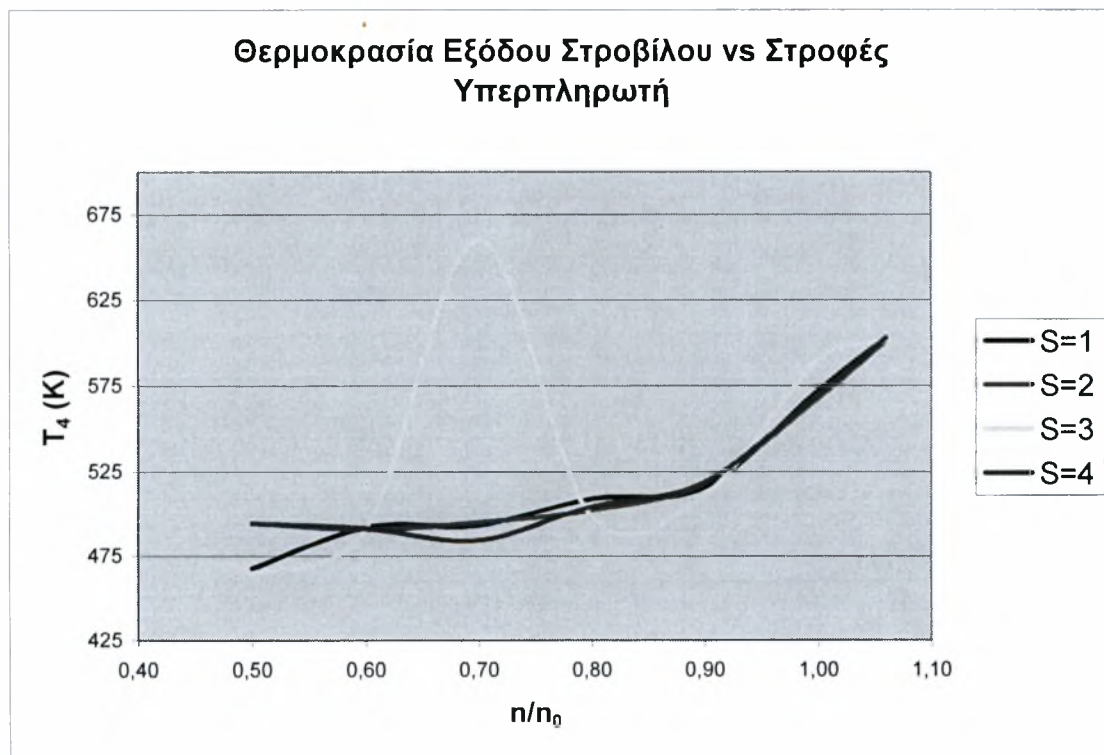
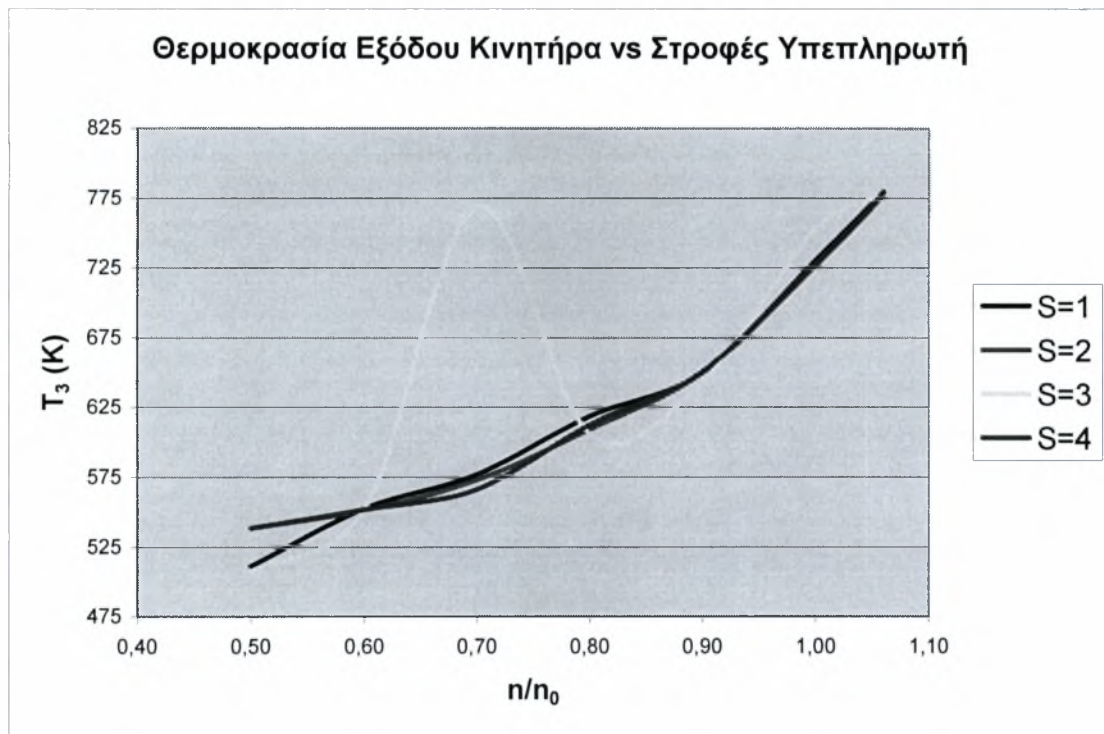


**Σχήμα Β.6 – Μεταβολή πίεσης εξόδου συμπιεστή & κινητήρα έναντι στροφών  
άξονα στροβιλοσυμπιεστή**



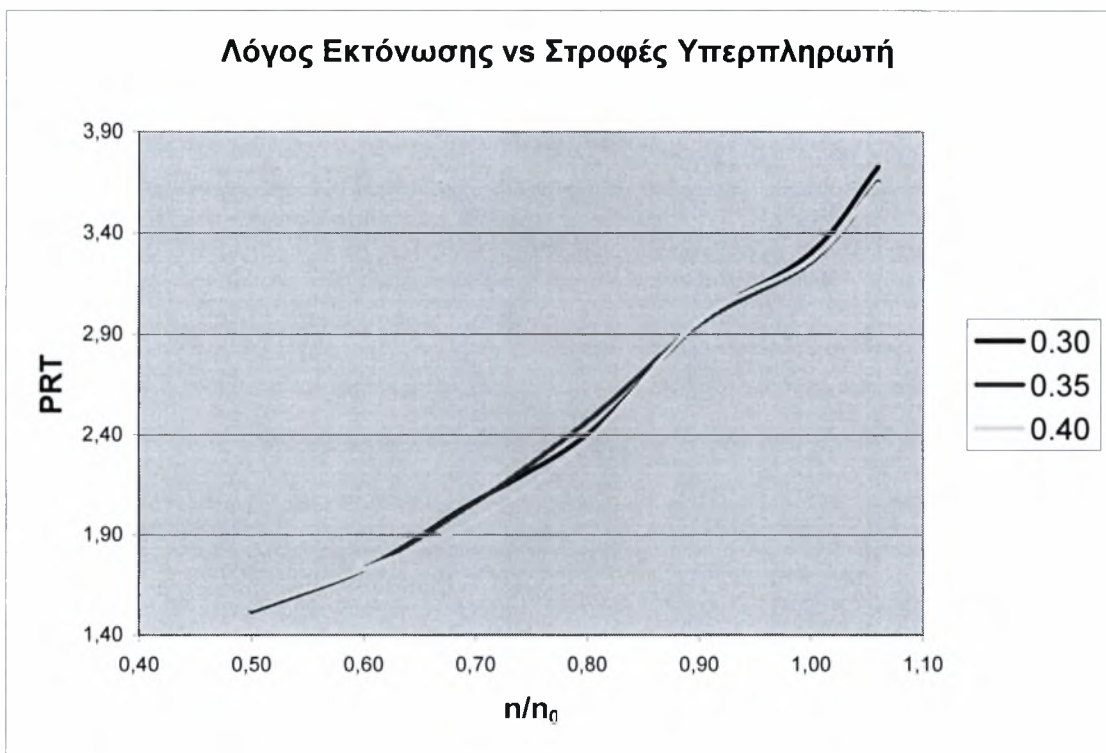
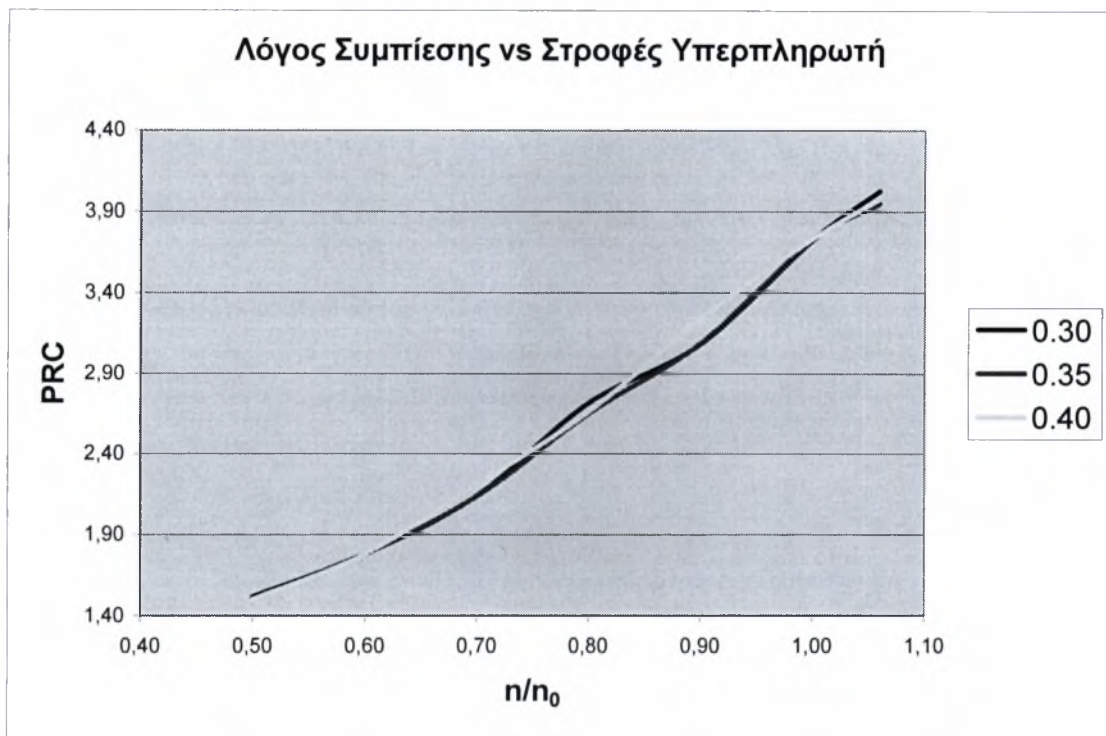
**Σχήμα Β.7.1 – Μεταβολή θερμοκρασίας εξόδου συμπίεστή & ψύκτη έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπίεστή**



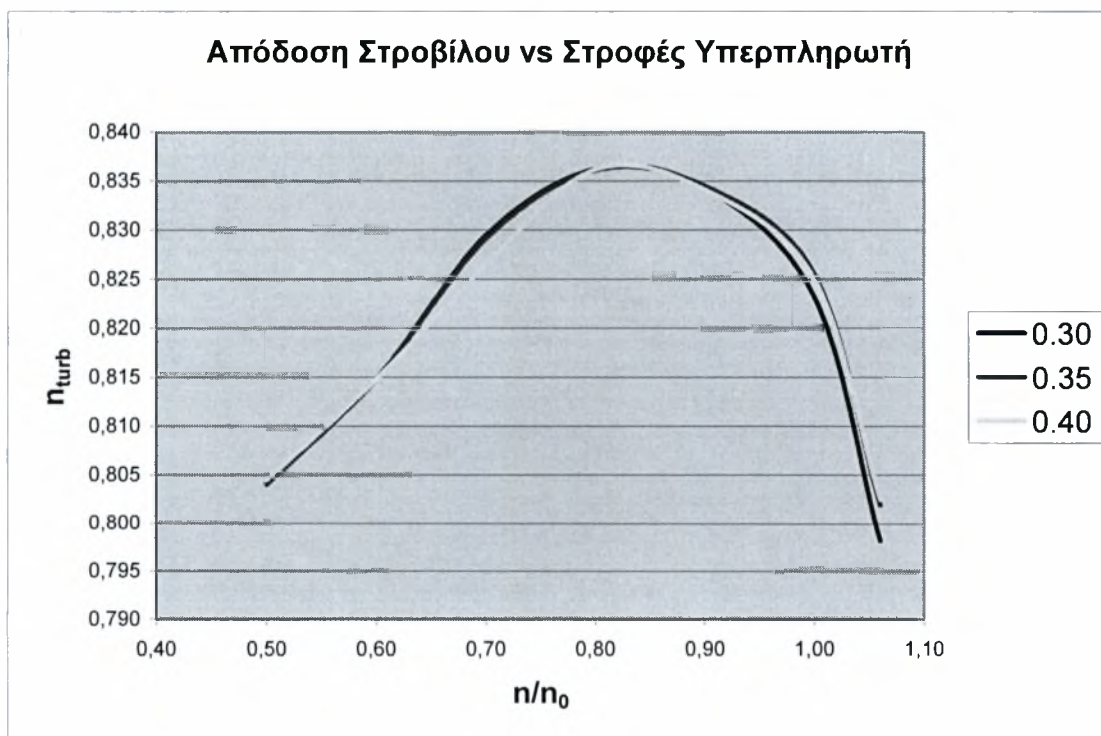
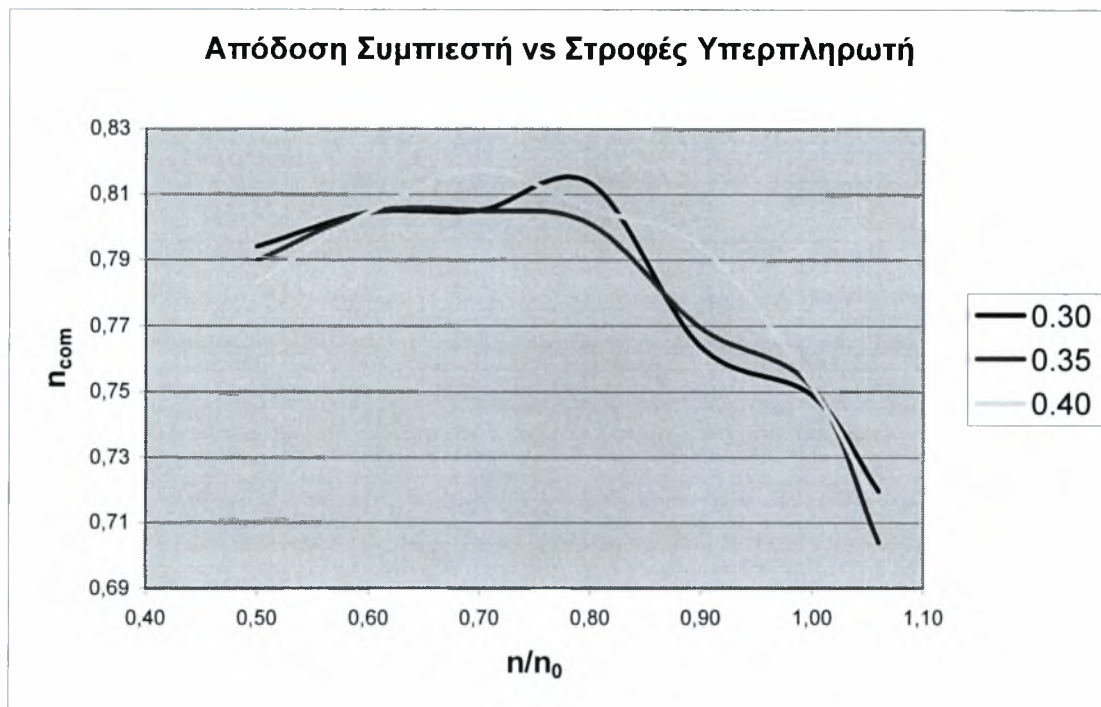


**Σχήμα Β.7.2 – Μεταβολή θερμοκρασίας εξόδου κινητήρα & στροβίλου έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή**

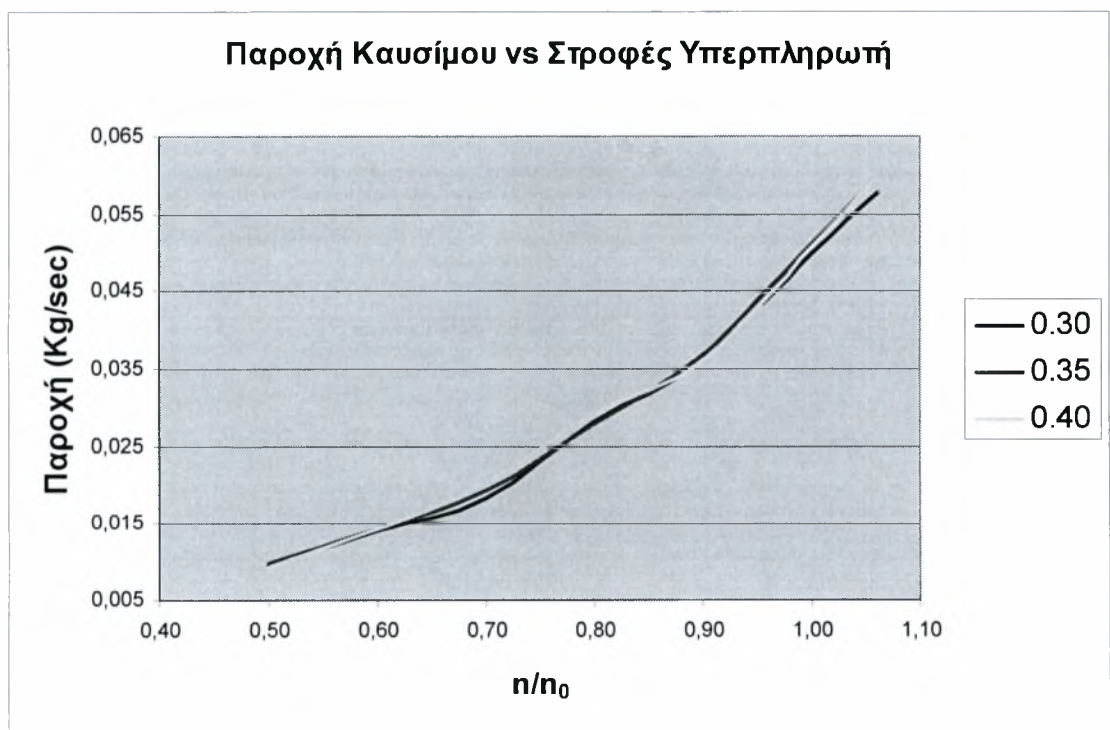
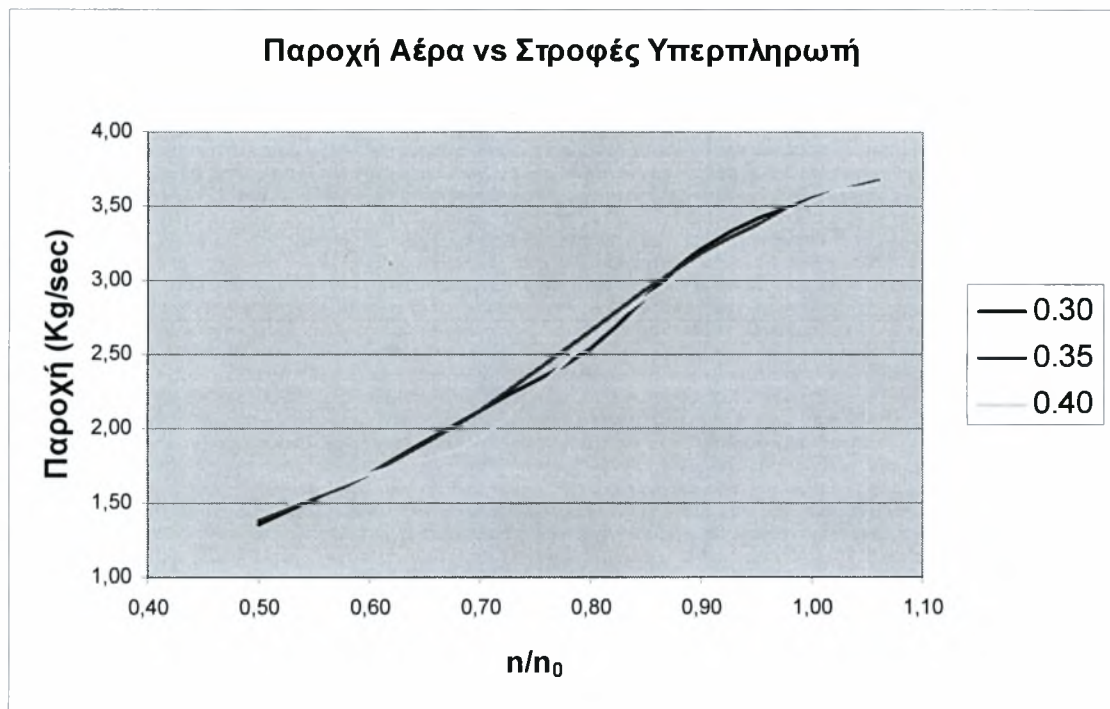




**Σχήμα Β.8 – Μεταβολή λόγου συμπίεσης & εκτόνωσης έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**

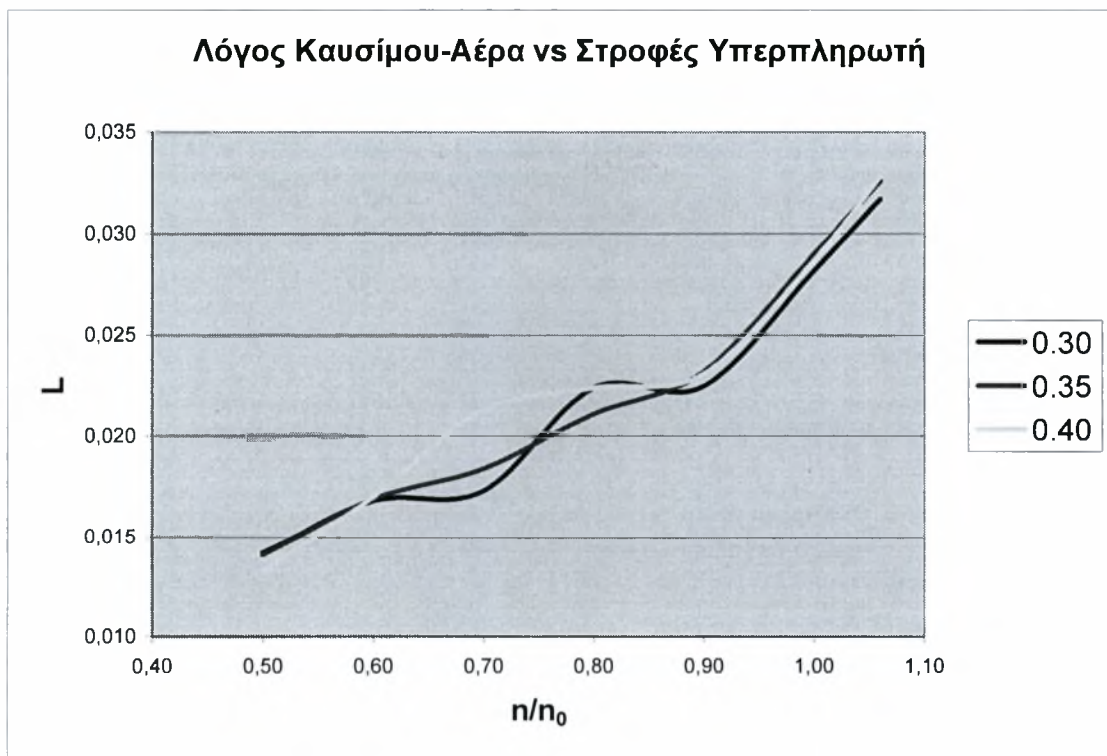
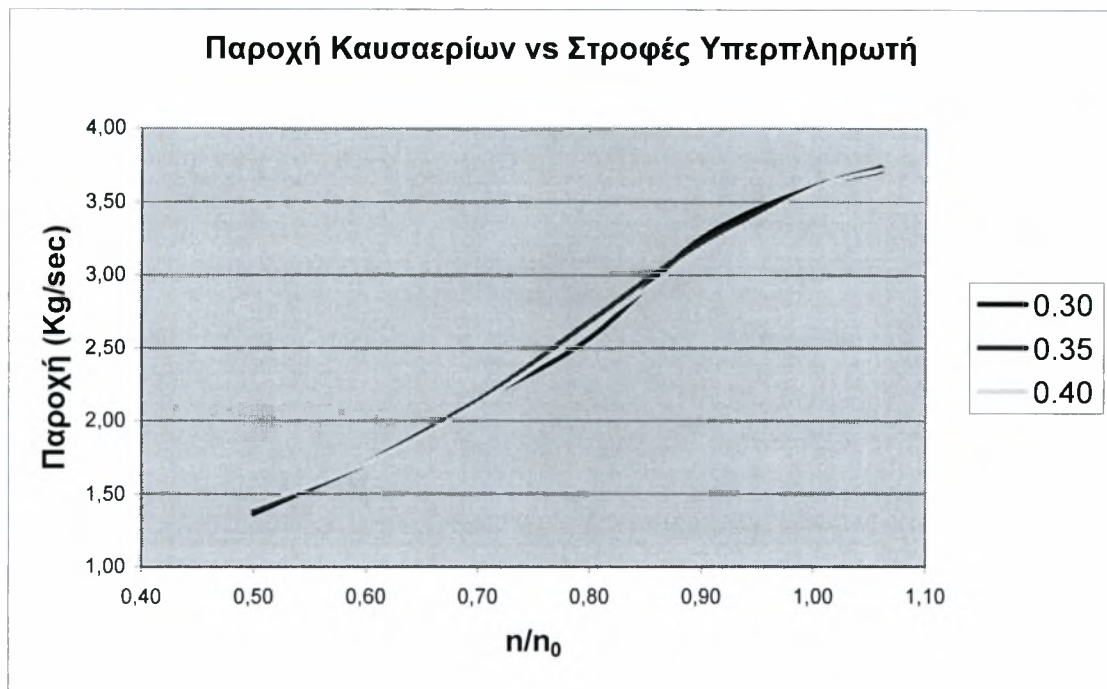


**Σχήμα Β.9 – Μεταβολή απόδοσης συμπίεστή & στροβίλου έναντι στροφών άξονα στροβίλοσυμπίεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**

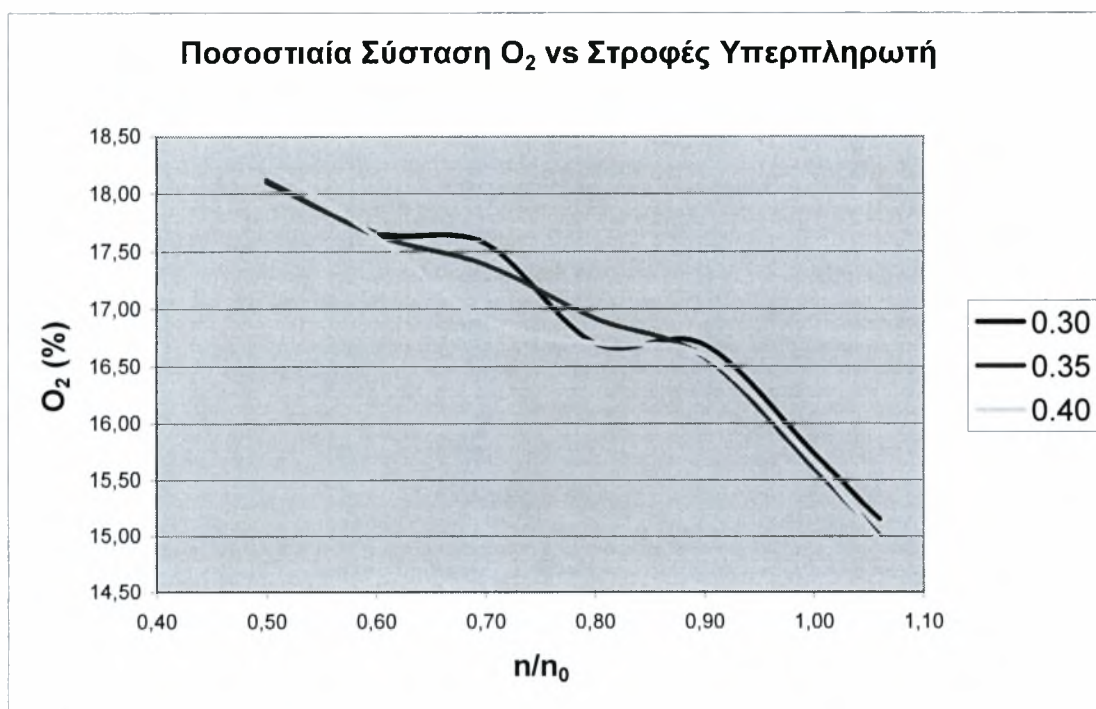
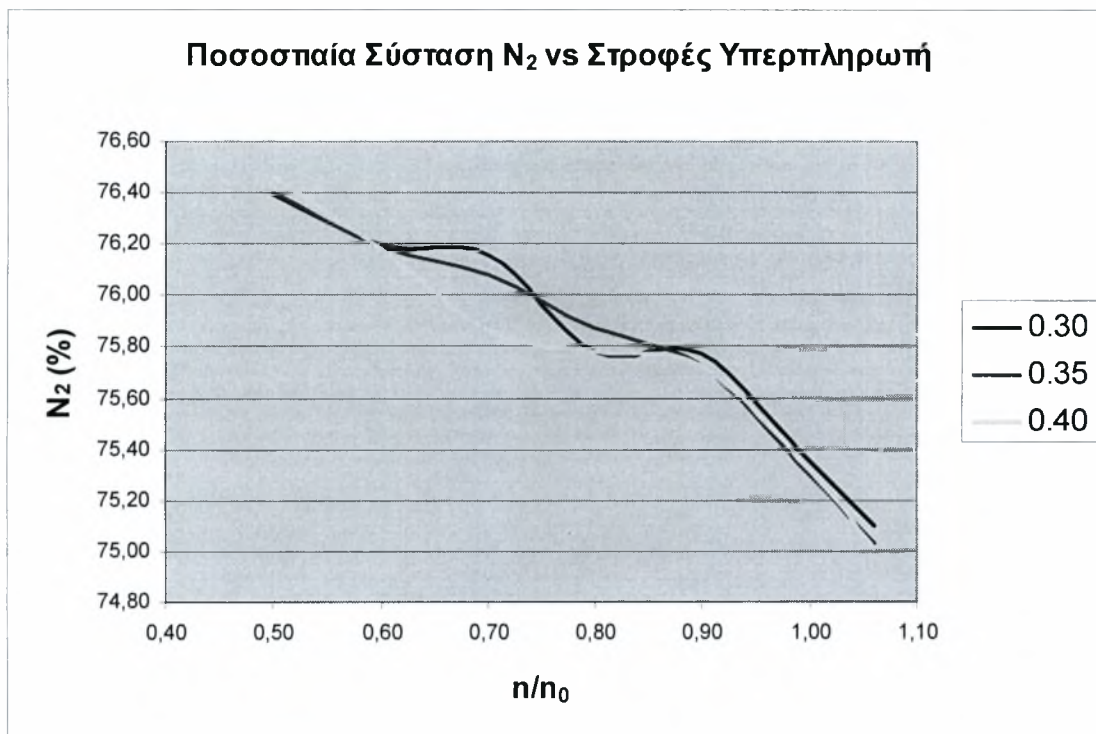


**Σχήμα Β.10 – Μεταβολή παροχών αέρα & καυσίμου έναντι στροφών άξονα  
στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**

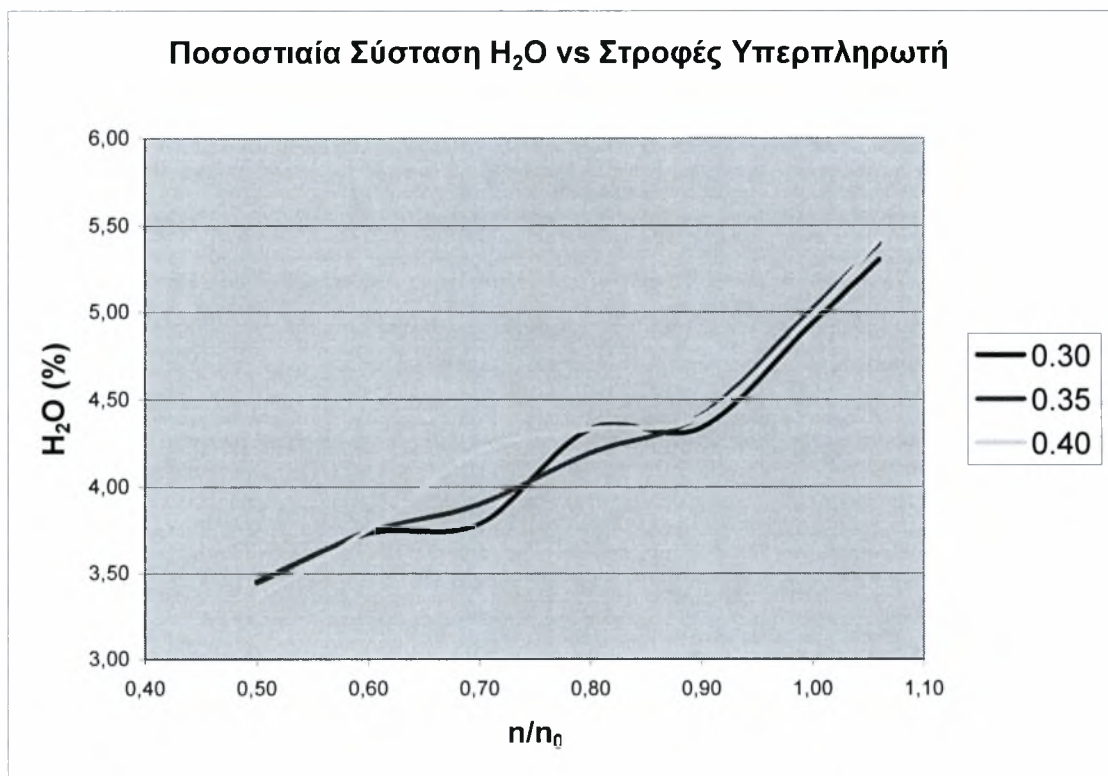
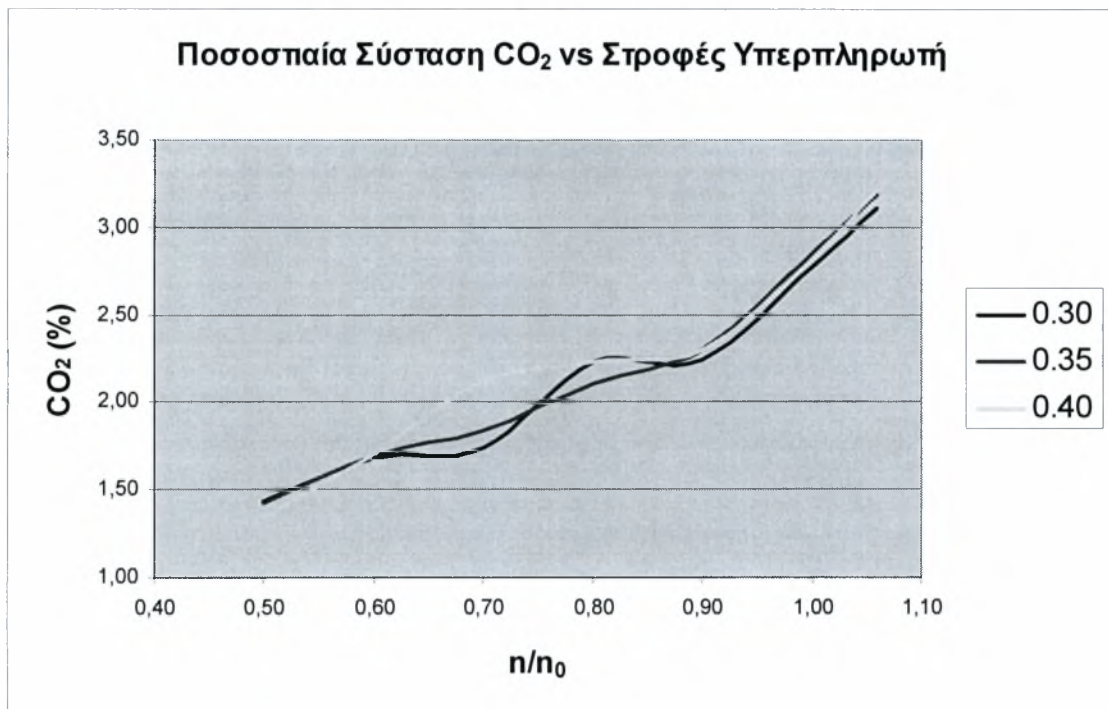




**Σχήμα Β.11 – Μεταβολή παροχής καυσαερίων & λόγου καυσίμου / αέρα έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**

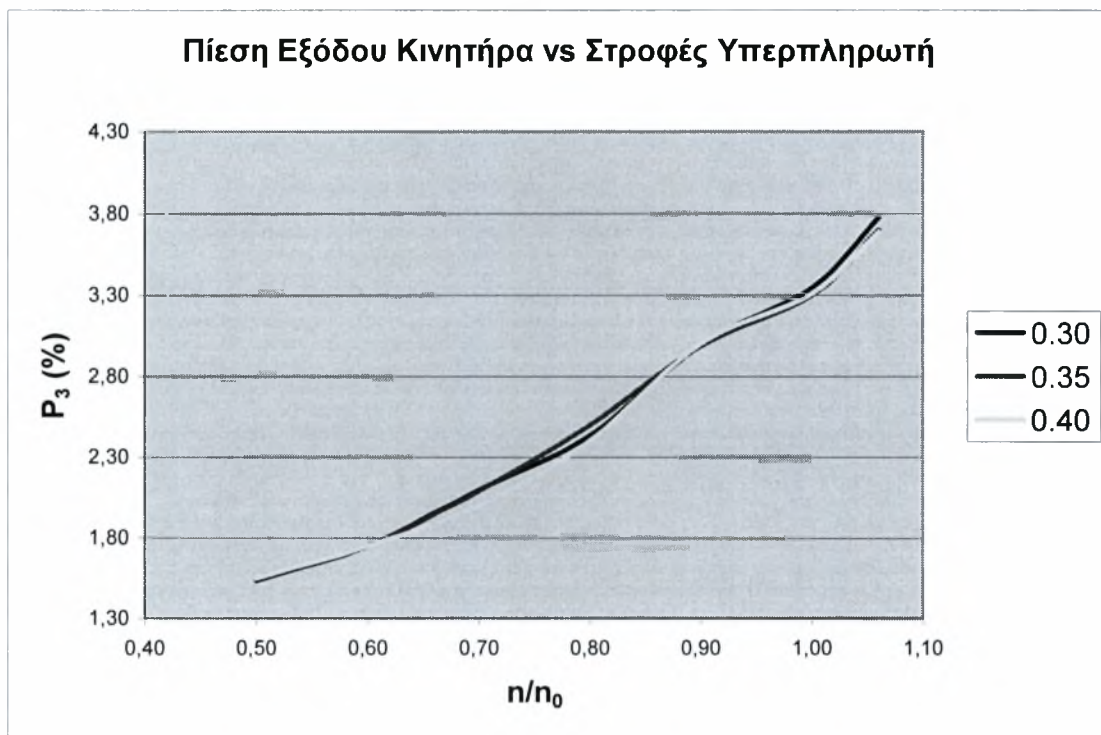
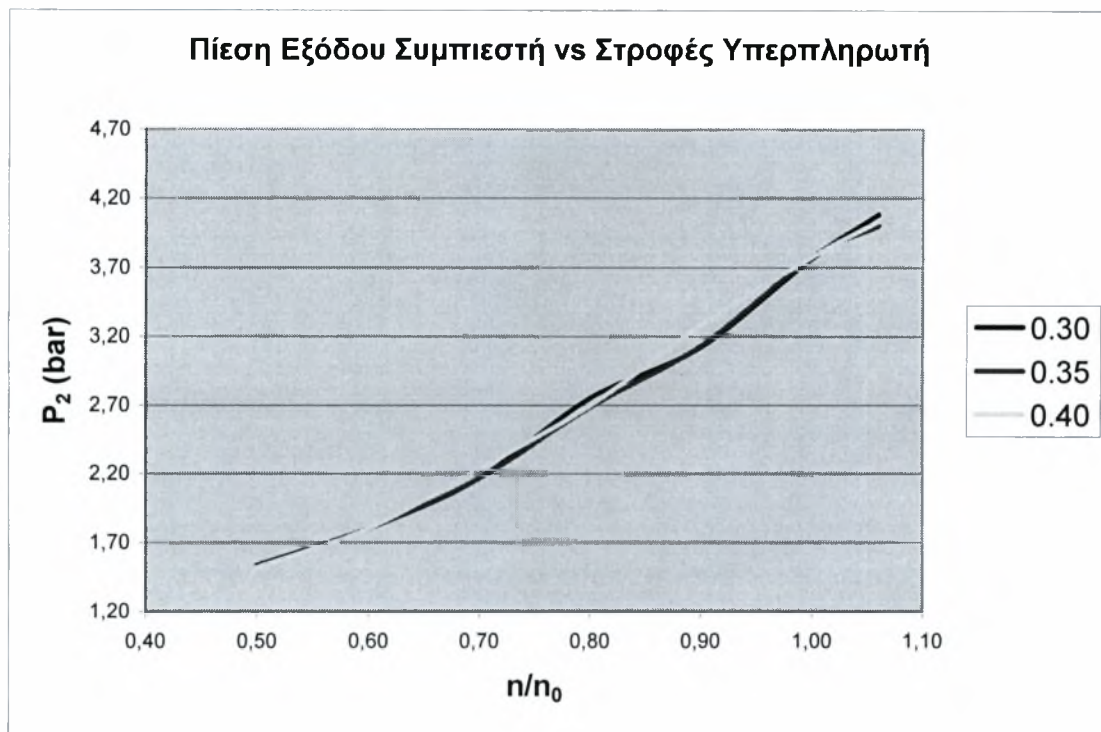


**Σχήμα Β.12.1 – Μεταβολή σύστασης καυσαερίων έναντι στροφών άξονα  
στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**



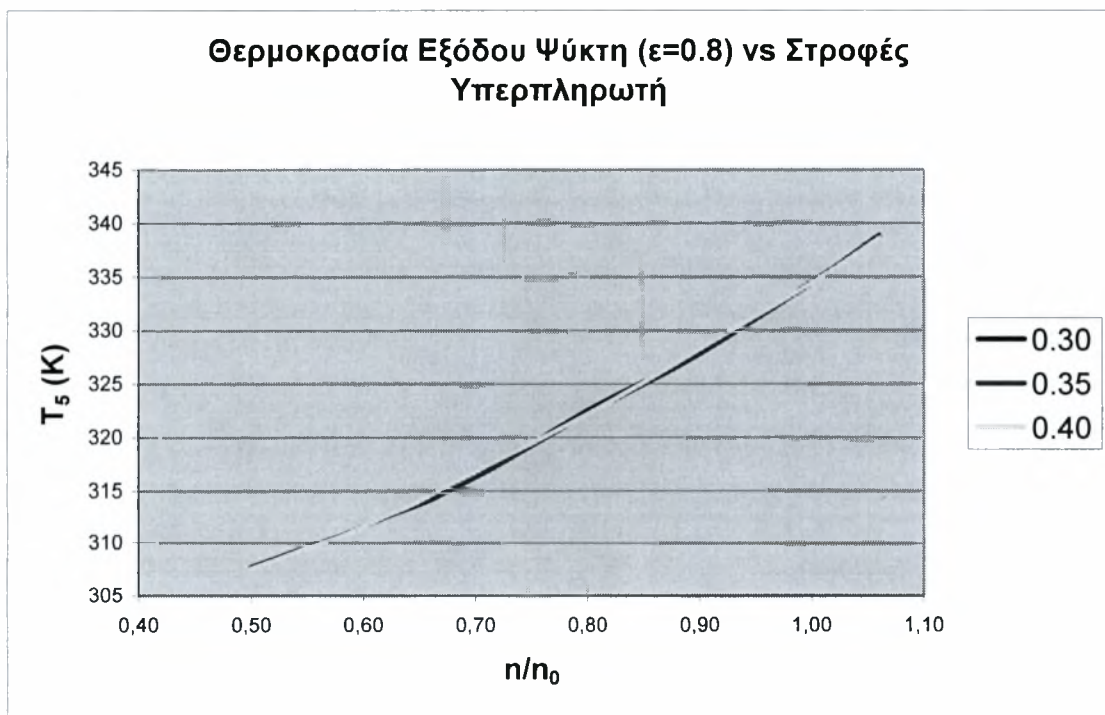
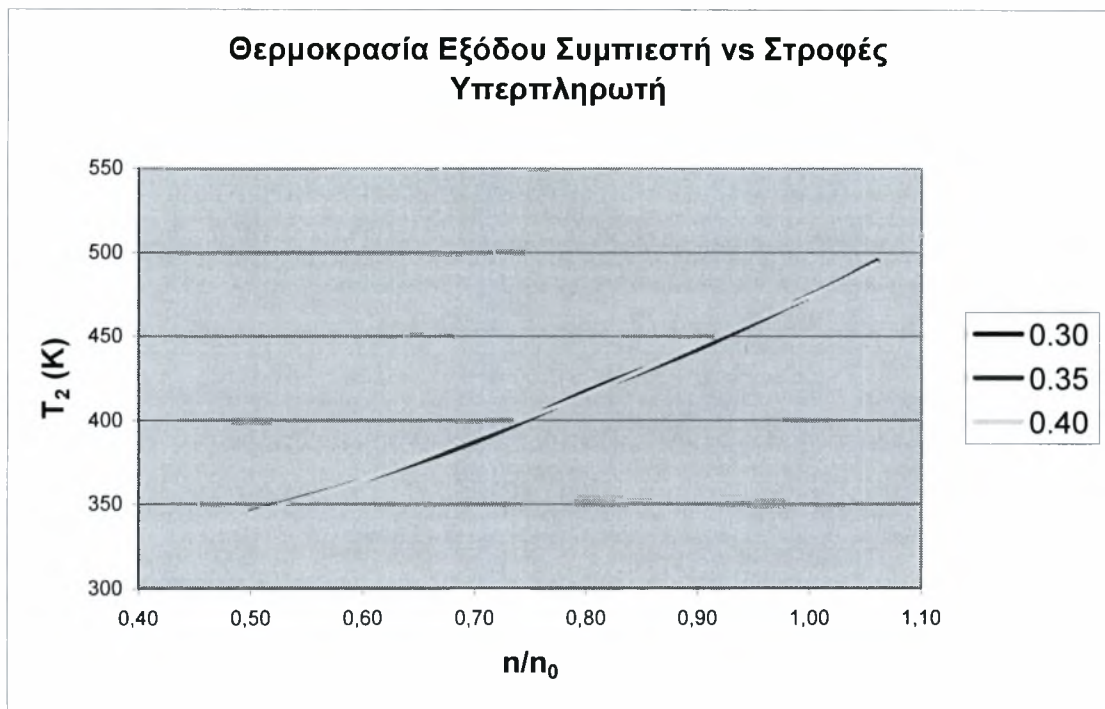
**Σχήμα Β.12.2 – Μεταβολή σύστασης καυσαερίων έναντι στροφών άξονα  
στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**



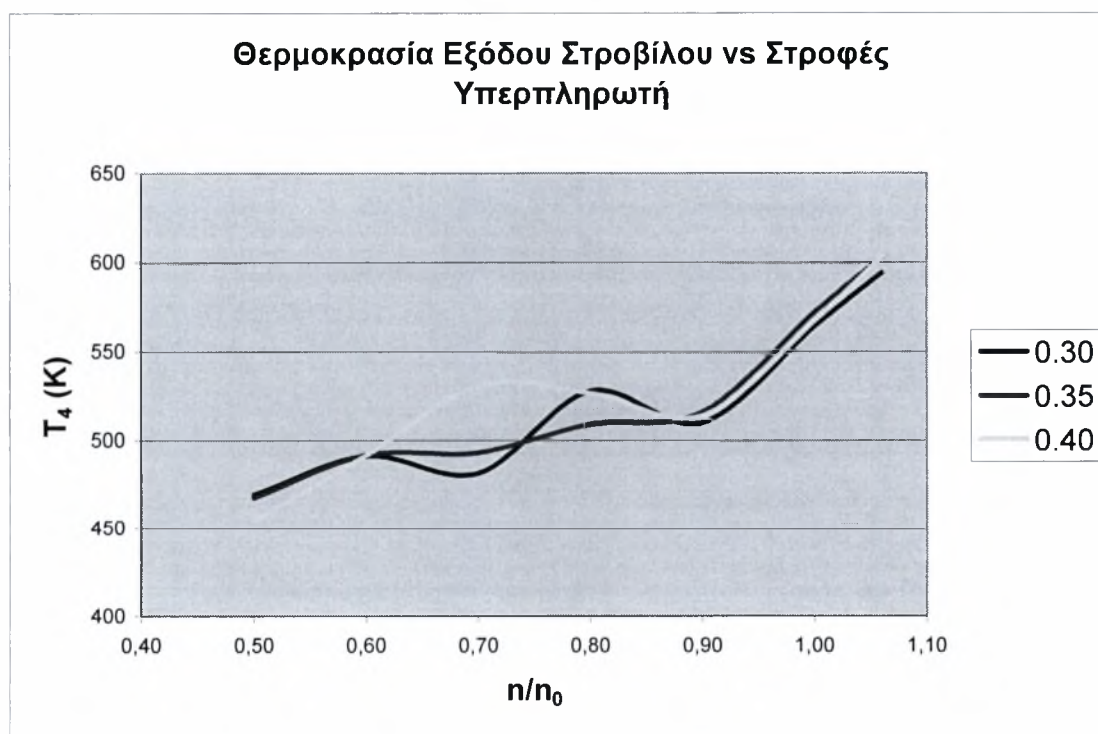
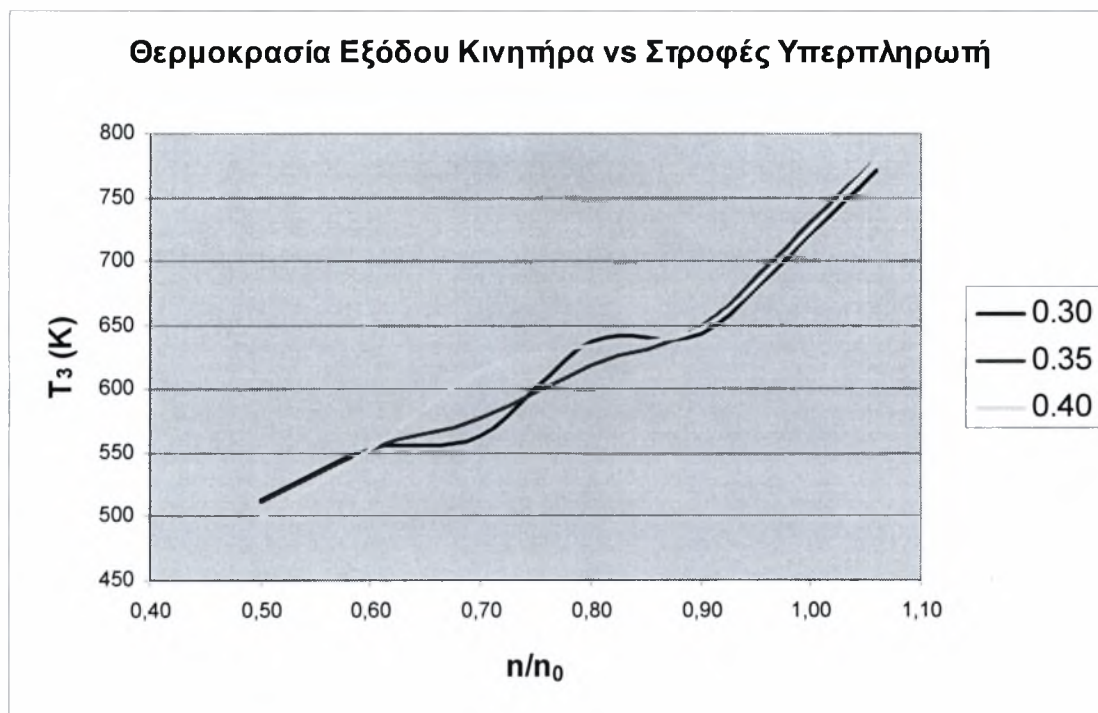


**Σχήμα Β.13 – Μεταβολή πίεσης εξόδου συμπιεστή & κινητήρα έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**





**Σχήμα B.14.1 – Μεταβολή θερμοκρασίας εξόδου συμπιεστή & ψύκτη έναντι  
στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης  
κινητήρα**



**Σχήμα Β.14.2 – Μεταβολή θερμοκρασίας εξόδου κινητήρα & στροβίλου έναντι στροφών άξονα στροβιλοσυμπιεστή για διάφορες τιμές θερμικής απόδοσης κινητήρα**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

*Ο Κώδικας Fortran «GAS TURBOCHARGER INTEGRATION SYSTEM»*

## PROGRAM TURBOCHARGER

C Developed By V. Gastis - July 2003

C Supervised By N. Vlachos And A. Stamatis – University Of Thessaly, Department

C Of Mechanical And Industrial Engineering – Volos, Greece.

IMPLICIT NONE

C

## INTEGER TOS,TOC

DOUBLE PRECISION EPS, EREG, DEL, DP, Nth, P, PRC, ScF, STR, T

C

WRITE(\*,\*) 'Program Simulating Turbocharger Used In Diesel'

WRITE(\*,\*) 'Locomotives'

WRITE(\*,\*)'

WRITE(\*,\*)'

WRITE(\*,\*) 'Give The Precision Of The Program & DEL :

```
READ(*,*) EPS,DEL
```

WRITE(\*,\*)'

WRITE(\*,\*) 'Choose Simulation / Adaptation: '

WRITE(\*,\*)'

WRITE(\*,\*) 'Enter 1 For Adaptation Using Experimental Data.'

```
WRITE(*,*) 'Enter 2 For Simple Simulation.'
```

WRITE(\*,\*) 'Enter 3 For Adapting PRC & K1.

WRITE(\*,\*) 'Enter 4 For Adapting PRC & K2.

WRITE(\*,\*)'

READ(\*,\*) TOS

WRITE(\*,\*)'

WRITE(\*,\*) 'The Design Point Of The Turbocharger, Used From The

WRITE(\*,\*) 'Program, Is 3,70(=PRC For n/n0=1).For Using This

WRITE(\*,\*) 'Compressor Type 1.For Using A Different Compressor

WRITE(\*,\*) 'Type 2.'

READ(\*,\*) TOC

WRITE(\*,\*)'

```

WRITE(*,*) 'Give The Thermal Efficiency Of The Diesel Engine: '
READ(*,*) Nth
WRITE(*,*) '
C
IF(LOC .EQ. 1) THEN
  ScF=1
C
ELSEIF(LOC .EQ. 2) THEN
  WRITE(*,*) 'Give The Design Point Of Your Compressor : '
  READ(*,*) DP
  ScF=DP/3.7
ENDIF
C
WRITE(*,*) 'Give A Turbocharger RPM Ratio : '
READ(*,*) STR
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) 'Give An Estimation Of Compressor Pressure Ratio For '
WRITE(*,*) 'The Specific RPM Ratio : '
READ(*,*) PRC
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) 'Give The Effectiveness Of The Intercooler (0 - 1). '
READ(*,*) EREG
C
IF(TOS .EQ. 1) THEN
  WRITE(*,*) 'Give A Value Of Temperature T3 (K) & Pressure P3 '
  WRITE(*,*) '(bar) From Experimental Data : '
  READ(*,*) T,P
  CALL SIMULATION1(EPS,EREG,Nth,STR,PRC,T,P,DEL,ScF)
C
ELSEIF(TOS .EQ. 2) THEN
  CALL SIMULATION2(EPS,EREG,Nth,STR,PRC,DEL,ScF)

```

```

C
ELSEIF(TOS .EQ. 3) THEN
WRITE(*,*) 'Give A Value Of Pressure P3 (bar) From Experimental '
WRITE(*,*) 'Data : '
READ(*,*) P
CALL SIMULATION3(EPS,EREG,Nth,STR,PRC,P,DEL,ScF)
C
ELSEIF(TOS .EQ. 4) THEN
WRITE(*,*) 'Give A Value Of Temper. T3 (K) From Experimental '
WRITE(*,*) 'Data : '
READ(*,*) T
CALL SIMULATION4(EPS,EREG,Nth,STR,PRC,T,DEL,ScF)
C
ENDIF
C
END
C-----C
C-----C
SUBROUTINE SIMULATION1(EPS,EREG,Nth,STR,PRC1,T3P,P3P,DEL,ScF)
IMPLICIT NONE
PARAMETER N=3
INTEGER I
DOUBLE PRECISION DEL,EPS,EREG,F(N),F2(N),FD(N),H1(5),H2(5),J1,J2,
J3,K1,K2,KA,KB,KN1,KN2,L1,L2,Ma1,Ma2,Mf1,Mf2,Mk1,
Mk2,NCOM1,NCOM2,Nth,NTURB1,NTURB2,P1(5),P2(5),P3P,
PRC1,PRC2,PRCN,PRT1,PRT2,S1(5),S2(5),ScF,STR,
SYSK1(4),SYSK2(4),T1(5),T2(5),T3P,W
C
CALL CONSTANTS(STR,K1,K2)
C
DO 500 I=1,1000000000

```

C

```
CALL TEST(STR,PRC1,EPS,EREG,Nth,K1,K2,DEL,ScF,P1(1),P1(2),P1(3),  
P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),  
H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),Ma1,Mf1,  
Mk1,L1,SYSK1,NCOM1,NTURB1,PRT1)
```

C

```
F(1)=(H1(1)-H1(2))+(1+L1)*(H1(3)-H1(4))  
F(2)=T1(3)-T3P  
F(3)=P1(3)-P3P
```

C

```
PRC2=PRC1+PRC1*DEL  
KA=K1+K1*DEL  
KB=K2+K2*DEL
```

C

```
CALL TEST(STR,PRC2,EPS,EREG,Nth,KA,KB,DEL,ScF,P2(1),P2(2),P2(3),  
P2(4),P2(5),T2(1),T2(2),T2(3),T2(4),T2(5),H2(1),H2(2),  
H2(3),H2(4),H2(5),S2(1),S2(2),S2(3),S2(4),S2(5),Ma2,Mf2,  
Mk2,L2,SYSK2,NCOM2,NTURB2,PRT2)
```

C

```
F2(1)=(H2(1)-H2(2))+(1+L2)*(H2(3)-H2(4))  
F2(2)=T2(3)-T3P  
F2(3)=P2(3)-P3P
```

C

```
FD(1)=(F2(1)-F(1))/(PRC2-PRC1)  
FD(2)=(F2(2)-F(2))/(KB-K2)  
FD(3)=(F2(3)-F(3))/(KA-K1)
```

C

```
PRCN=PRC1-(F(1)/FD(1))  
KN2=K2-(F(2)/FD(2))  
KN1=K1-(F(3)/FD(3))
```

C



```

J1=ABS((PRCN-PRC1)/PRCN)
J2=ABS((KN1-K1)/KN1)
J3=ABS((KN2-K2)/KN2)
W=MAX(J2,J3)

C
IF (J1 .LE. EPS .AND. W .LE. EPS*100) THEN
C
CALL RESULTS(I,STR,PRCN,PRT1,NCOM1,NTURB1,Ma1,Mf1,Mk1,L1,SYSK1,
.          P1(1),P1(2),P1(3),P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),
.          T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),
.          S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),KN1,KN2)
RETURN
C
ELSE
PRC1=PRCN
K1=KN1
K2=KN2
ENDIF

C
500 CONTINUE
C
END

C-----C
SUBROUTINE SIMULATION2(EPS,EREG,Nth,STR,PRC1,DEL,ScF)
IMPLICIT NONE
INTEGER I
DOUBLE PRECISION DEL,EPS,EREG,F1,F2,FD,H1(5),H2(5),J1,K1,K2,L1,L2,
.          Ma1,Ma2,Mf1,Mf2,Mk1,Mk2,NCOM1,NCOM2,Nth,NTURB1,
.          NTURB2,P1(5),P2(5),PRC1,PRC2,PRCN,PRT1,PRT2,
.          S1(5),S2(5),ScF,STR,SYSK1(4),SYSK2(4),T1(5),T2(5)
C

```

```

CALL CONSTANTS(STR,K1,K2)
C
DO 500 I=1,10000000000
C
CALL TEST(STR,PRC1,EPS,EREG,Nth,K1,K2,DEL,ScF,P1(1),P1(2),P1(3),
.      P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),
.      H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),Ma1,Mf1,
.      Mk1,L1,SYSK1,NCOM1,NTURB1,PRT1)
C
F1=(H1(1)-H1(2))+(1+L1)*(H1(3)-H1(4))
C
PRC2=PRC1+PRC1*DEL
C
CALL TEST(STR,PRC2,EPS,EREG,Nth,K1,K2,DEL,ScF,P2(1),P2(2),P2(3),
.      P2(4),P2(5),T2(1),T2(2),T2(3),T2(4),T2(5),H2(1),H2(2),
.      H2(3),H2(4),H2(5),S2(1),S2(2),S2(3),S2(4),S2(5),Ma2,Mf2,
.      Mk2,L2,SYSK2,NCOM2,NTURB2,PRT2)
C
F2=(H2(1)-H2(2))+(1+L2)*(H2(3)-H2(4))
FD=(F2-F1)/(PRC2-PRC1)
PRCN=PRC1-(F1/FD)
J1=ABS((PRCN-PRC1)/PRCN)
C
IF (J1 .LE. EPS) THEN
CALL RESULTS(I,STR,PRCN,PRT1,NCOM1,NTURB1,Ma1,Mf1,Mk1,L1,SYSK1,
.      P1(1),P1(2),P1(3),P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),
.      T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),
.      S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),K1,K2)
RETURN
ELSE
PRC1=PRCN

```

```

ENDIF
500 CONTINUE
C
END
C-----C
SUBROUTINE SIMULATION3(EPS,EREG,Nth,STR,PRC1,P3P,DEL,ScF)
IMPLICIT NONE
PARAMETER N=2
INTEGER I
DOUBLE PRECISION DEL,EPS,EREG,F(N),F2(N),FD(N),H1(5),H2(5),J1,J2,
.           K1,K2,KA,KN1,L1,L2,Ma1,Ma2,Mf1,Mf2,Mk1,Mk2,NCOM1,
.           NCOM2,Nth,NTURB1,NTURB2,P1(5),P2(5),P3P,PRC1,PRC2,
.           PRCN,PRT1,PRT2,S1(5),S2(5),ScF,STR,SYSK1(4),
.           SYSK2(4),T1(5),T2(5)
C
CALL CONSTANTS(STR,K1,K2)
C
DO 500 I=1,10000000000
C
CALL TEST(STR,PRC1,EPS,EREG,Nth,K1,K2,DEL,ScF,P1(1),P1(2),P1(3),
.         P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),
.         H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),Ma1,Mf1,
.         Mk1,L1,SYSK1,NCOM1,NTURB1,PRT1)
C
F(1)=(H1(1)-H1(2))+(1+L1)*(H1(3)-H1(4))
F(2)=P1(3)-P3P
C
PRC2=PRC1+PRC1*DEL
KA=K1+K1*DEL
C
CALL TEST(STR,PRC2,EPS,EREG,Nth,KA,K2,DEL,ScF,P2(1),P2(2),P2(3),

```

```

        P2(4),P2(5),T2(1),T2(2),T2(3),T2(4),T2(5),H2(1),H2(2),
        H2(3),H2(4),H2(5),S2(1),S2(2),S2(3),S2(4),S2(5),Ma2,Mf2,
        Mk2,L2,SYSK2,NCOM2,NTURB2,PRT2)
C
    F2(1)=(H2(1)-H2(2))+(1+L2)*(H2(3)-H2(4))
    F2(2)=P2(3)-P3P
C
    FD(1)=(F2(1)-F(1))/(PRC2-PRC1)
    FD(2)=(F2(2)-F(2))/(KA-K1)
C
    PRCN=PRC1-(F(1)/FD(1))
    KN1=K1-(F(2)/FD(2))
C
    J1=ABS((PRCN-PRC1)/PRCN)
    J2=ABS((KN1-K1)/KN1)
C
    IF (J1 .LE. EPS .AND. J2 .LE. EPS*100) THEN
C
        CALL RESULTS(I,STR,PRCN,PRT1,NCOM1,NTURB1,Ma1,Mf1,Mk1,L1,SYSK1,
        P1(1),P1(2),P1(3),P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),
        T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),
        S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),KN1,K2)
        RETURN
    ELSE
        PRC1=PRCN
        K1=KN1
    ENDIF
500 CONTINUE
C
    END
C-----C

```

```

SUBROUTINE SIMULATION4(EPS,EREG,Nth,STR,PRC1,T3P,DEL,ScF)
IMPLICIT NONE
PARAMETER N=2
INTEGER I
DOUBLE PRECISION DEL,EPS,EREG,F(N),F2(N),FD(N),H1(5),H2(5),J1,J2,
.           K1,K2,KB,KN2,L1,L2,Ma1,Ma2,Mf1,Mf2,Mk1,Mk2,NCOM1,
.           NCOM2,Nth,NTURB1,NTURB2,P1(5),P2(5),PRC1,PRC2,
.           PRCN,PRT1,PRT2,S1(5),S2(5),ScF,STR,SYSK1(4),
.           SYSK2(4),T1(5),T2(5),T3P
C
CALL CONSTANTS(STR,K1,K2)
C
DO 500 I=1,10000000000
C
CALL TEST(STR,PRC1,EPS,EREG,Nth,K1,K2,DEL,ScF,P1(1),P1(2),P1(3),
.         P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),
.         H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),Ma1,Mf1,
.         Mk1,L1,SYSK1,NCOM1,NTURB1,PRT1)
C
F(1)=(H1(1)-H1(2))+(1+L1)*(H1(3)-H1(4))
F(2)=T1(3)-T3P
C
PRC2=PRC1+PRC1*DEL
KB=K2+K2*DEL
C
CALL TEST(STR,PRC2,EPS,EREG,Nth,K1,KB,DEL,ScF,P2(1),P2(2),P2(3),
.         P2(4),P2(5),T2(1),T2(2),T2(3),T2(4),T2(5),H2(1),H2(2),
.         H2(3),H2(4),H2(5),S2(1),S2(2),S2(3),S2(4),S2(5),Ma2,Mf2,
.         Mk2,L2,SYSK2,NCOM2,NTURB2,PRT2)
C
F2(1)=(H2(1)-H2(2))+(1+L2)*(H2(3)-H2(4))

```

```

      F2(2)=T2(3)-T3P
C
      FD(1)=(F2(1)-F(1))/(PRC2-PRC1)
      FD(2)=(F2(2)-F(2))/(KB-K2)
C
      PRCN=PRC1-(F(1)/FD(1))
      KN2=K2-(F(2)/FD(2))
C
      J1=ABS((PRCN-PRC1)/PRCN)
      J2=ABS((KN2-K2)/KN2)
C
      IF (J1 .LE. EPS .AND. J2 .LE. EPS*100) THEN
C
      CALL RESULTS(I,STR,PRCN,PRT1,NCOM1,NTURB1,Ma1,Mf1,Mk1,L1,SYSK1,
      .           P1(1),P1(2),P1(3),P1(4),P1(5),T1(1),T1(2),T1(3),
      .           T1(4),T1(5),H1(1),H1(2),H1(3),H1(4),H1(5),S1(1),
      .           S1(2),S1(3),S1(4),S1(5),K1,KN2)
      RETURN
      ELSE
      PRC1=PRCN
      K2=KN2
      ENDIF
500 CONTINUE
C
      END
C-----C
SUBROUTINE TEST(PX,PY,EPS,EREG,Nth,KA1,KA2,DEL,ScF,P1,P2,P3,P4,P5,
      .           T1,T2,T3,T4,T5,H1,H2,H3,H4,H5,S1,S2,S3,S4,S5,Ma,
      .           Mf,Mkaus,L,SYSK,NCOM,NTURB,PRT)
      IMPLICIT NONE
C

```

```

PARAMETER N=49,NC=17,NW=26,NR=4

C
INTEGER I1,I2,I3,I4,IER,LCELL(NR,NR),LNEXT(N),NOBS

C
DOUBLE PRECISION A(9,N),B1(65),B2(65),B3(65),CS2VAL,DEL,DX,DY,EPS,
.      EREG,G1(6),G2(6),H1,H2,H2is,H3,H4,H4is,H5,Hc,Hf,
.      KA1,KA2,K2,K3,K4,K4is,L,LHV,Ma,MBa,MBf,Mkaus,Mf,
.      NCOM,Nth,NTURB,P1,P2,P3,P4,P5,PRC,PRT,PX,PY,R,
.      RMAX,RW(N),S1,S2,S3,S4,S5,ScF,SEVAL,STAE(4,6),
.      SYS(4),SYSK(4),T1,T2,T3,T4,T5,X1(N),X2(N),
.      XDATA(65),XMIN,Y1,Y2,Y2is,Y3,Y4,Y4is,Y5,YA(N),
.      YB(N),YDATA(65),YMIN,Z1,Z3

C
OPEN(5,FILE='DEDOMENA.TXT')

C
DO 10 I1=1,4
  READ(5,*) SYS(I1)
10 CONTINUE
  READ(5,*) P1,T1,MBa,R

C
DO 20 I2=1,4
  READ(5,*) STAE(I2,1),STAE(I2,2),STAE(I2,3),STAE(I2,4),
.      STAE(I2,5),STAE(I2,6)
20 CONTINUE
  READ(5,*) K2,K3,K4is,K4

C
  READ(5,*) MBf,LHV,Hf

C
DO 30 I3=1,N
  READ(5,*) X1(I3),X2(I3),YA(I3),YB(I3)
  X2(I3)=X2(I3)*ScF

```



```

        YA(I3)=YA(I3)*ScF
30 CONTINUE
C
        READ(5,*) NOBS
        DO 40 I4=1,NOBS
            READ(5,*) XDATA(I4),YDATA(I4)
40 CONTINUE
C
        CLOSE(5)
C
        Y1=T1/1000
        K2=K2/1000
        K4is=K4is/1000
        K4=K4/1000
C
        CALL CSHEP2(N,X1,X2,YA,NC,NW,NR,LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,DX,DY,
            ,
            RMAX,RW,A,IER)
        Ma=CS2VAL(PX,PY,N,X1,X2,YA,NR,LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,DX,DY,
            RMAX,RW,A)
C
        CALL CSHEP2(N,X1,X2,YB,NC,NW,NR,LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,DX,
            ,
            DY,RMAX,RW,A,IER)
        NCOM=CS2VAL(PX,PY,N,X1,X2,YB,NR,LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,DX,
            ,
            DY,RMAX,RW,A)
C
        PRC=PY
        P2=P1*PRC
C
        CALL GIN(SYS,STAE,G1)
        CALL ENTH(G1,Y1,H1)
        CALL ENTR(G1,Y1,S1)

```

Z1=S1+R\*DLOG(PRC)

C

CALL NRA(K2,EPS,Y2is,G1(2),G1(3),G1(4),G1(5)/2,G1(6)/2,Z1)

CALL ENTH(G1,Y2is,H2is)

H2=H1+(H2is-H1)/NCOM

CALL RN(Y2is,EPS,Y2,G1(1),G1(3),G1(4)/2,G1(5),G1(6)/3,H2)

T2=Y2\*1000

CALL ENTR(G1,Y2,S2)

C

Hc=H1

H5=H2-EREG\*(H2-Hc)

CALL RN(Y1,EPS,Y5,G1(1),G1(3),G1(4)/2,G1(5),G1(6)/3,H5)

T5=Y5\*1000

CALL ENTR(G1,Y5,S5)

P5=0.98\*P2

C

P3=KA1\*P5

CALL CHECKT3Mf(EPS,DEL,KA2,Nth,P3,MBa,STAE,MBf,Ma,H5,LHV,Hf,  
T5,K3,H3,Mf,SYSK,L,G2,T3)

Y3=T3/1000

Mkaus=Ma+Mf

CALL ENTR(G2,Y3,S3)

C

P4=P1

PRT=P3/P4

Z3=S3-R\*DLOG(PRT)

C

CALL NRA(K4is,EPS,Y4is,G2(2),G2(3),G2(4),G2(5)/2,G2(6)/2,Z3)

CALL ENTH(G2,Y4is,H4is)

C

IF(PRT.LT. XDATA(1)) THEN

```

NTURB=YDATA(1)
GO TO 100
ENDIF
IF(PRT .GT. XDATA(NOBS)) THEN
NTURB=YDATA(NOBS)
GO TO 100
ENDIF
C
CALL SPLINE(NOBS,XDATA,YDATA,B1,B2,B3)
NTURB=SEVAL(NOBS,PRT,XDATA,YDATA,B1,B2,B3)
100 NTURB=NTURB/100
C
H4=H3-((H3-H4is)*NTURB)
CALL RN(K4,EPS,Y4,G2(1),G2(3),G2(4)/2,G2(5),G2(6)/3,H4)
T4=Y4*1000
CALL ENTR(G2,Y4,S4)
C
RETURN
END
C-----C
SUBROUTINE CSHEP2(N,X,Y,F,NC,NW,NR,LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,
,
DX,DY,RMAX,RW,A,IER)
PARAMETER LMX=49
INTEGER I,N,NC,NW,NR,LCELL(NR,NR),LNEXT(N),IER,IERR,IP1,IRM1,
,
IROW,J,JP1,K,LMAX,LNP,NEQ,NN,NNC,NNR,NNW,NP,
,
NPTS(LMX),NCWMAX
DOUBLE PRECISION X(N),Y(N),F(N),XMIN,YMIN,DX,DY,RMAX, RW(N),
,
A(9,N), B(10,10),C,DDX,DDY,DMIN,DTOL, FK,RC,
,
RS,RSMX,RSOLD, RTOL,RWS,S,SF, SFC,SFS,STF,
,
SUM,T,XK,XMN,YK,YMN
C

```

```

DATA  RTOL/1.D-5/, DTOL/.01/

C
NN=N
NNC=NC
NNW=NW
NNR=NR
NCWMAX=MAX(NNC,NNW)
LMAX=MIN(LMX,NN-1)
IF(NNC .LT. 9 .OR. NNW .LT. 1 .OR. NCWMAX .GT. LMAX .OR. NNR .
. LT. 1) GO TO 21

C
CALL STORE2(NN,X,Y,NNR,LCELL,LNEXT,XMN,YMN,DDX,DDY,IERR)
IF(IERR .NE. 0) GO TO 23
RSMX=0.

C
DO 16 K=1,NN
  XK=X(K)
  YK=Y(K)
  FK=F(K)

C
  LNEXT(K)=-LNEXT(K)

C
  RS=0.
  SUM=0.
  RWS=0.
  RC=0.
  LNP=0

C
  I SUM=SUM+RS
  IF(LNP .EQ. LMAX) GO TO 2
  LNP=LNP+1

```

```

RSOLD=RS
CALL GETNP2(XK,YK,X,Y,NNR,LCELL,LNEXT,XMN,YMN,DDX,DDY,
            NP,RS)
IF(RS .EQ. 0.) GO TO 22
NPTS(LNP)=NP
IF((RS-RSOLD)/RS .LT. RTOL) GO TO 1
IF(RWS .EQ. 0. .AND. LNP .GT. NNW) RWS=RS
IF(RC .EQ. 0. .AND. LNP .GT. NNC) THEN
C
    NEQ=LNP-1
    RC=SQRT(RS)
    SFS=DBLE(NEQ)/SUM
    ENDIF
C
    IF(LNP .GT. NCWMAX) GO TO 3
    GO TO 1
C
2  IF(RWS .EQ. 0.) RWS=1.1*RS
    IF(RC .EQ. 0.) THEN
        NEQ=LMAX
        RC=SQRT(1.1*RS)
        SFS=DBLE(NEQ)/SUM
    ENDIF
C
3  RW(K)=SQRT(RWS)
    IF(RWS .GT. RSMX) RSMX=RWS
    SF=SQRT(SFS)
    SFC=SF*SFS
C
    I=0
4  I=I+1

```

```

NP=NPTS(I)
  IROW=MIN(I,10)
  CALL SETUP2(XK,YK,FK,X(NP),Y(NP),F(NP),SF,SFS,SFC,RC,B(1,IROW))
  IF(I .EQ. 1) GO TO 4
  IRM1=IROW-1
  DO 5 J=1,IRM1
    JP1=J+1
    CALL GIVENS(B(J,J),B(J,IROW),C,S)
    CALL ROTATE(10-J,C,S,B(JP1,J),B(JP1,IROW))
5  CONTINUE
  IF(I .LT. NEQ) GO TO 4
C
  DMIN=MIN(ABS(B(1,1)),ABS(B(2,2)),ABS(B(3,3)),ABS(B(4,4)),
.  ABS(B(5,5)),ABS(B(6,6)),ABS(B(7,7)),ABS(B(8,8)),ABS(B(9,9)))
  IF(DMIN*RC .GE. DTOL) GO TO 11
  IF(NEQ .EQ. LMAX) GO TO 7
C
6 RSOLD=RS
  NEQ=NEQ+1
  IF(NEQ .EQ. LMAX) THEN
    RC=SQRT(1.1*RS)
    GO TO 4
  ENDIF
  IF(NEQ .LT. LNP) THEN
    NP=NPTS(NEQ+1)
    RS=(X(NP)-XK)**2+(Y(NP)-YK)**2
    IF((RS-RSOLD)/RS .LT. RTOL) GO TO 6
    RC=SQRT(RS)
    GO TO 4
  ENDIF
C

```



```

      LNP=LNP+1
      CALL GETNP2(XK,YK,X,Y,NNR,LCELL,LNEXT,XMN,YMN,DDX,DDY,
      .
      NP,RS)
      IF(NP .EQ. 0) GO TO 22
      NPTS(LNP)=NP
      IF((RS-RSOLD)/RS .LT. RTOL) GO TO 6
      RC=SQRT(RS)
      GO TO 4
C
7 STF=1.0/RC
DO 10 I=1,4
      B(I,10)=STF
      IP1=I+1
      DO 8 J=IP1,10
            B(J,10)=0.
8  CONTINUE
      DO 9 J=I,9
            JP1=J+1
            CALL GIVENS(B(J,J),B(J,10),C,S)
            CALL ROTATE(10-J,C,S,B(JP1,J),B(JP1,10))
9  CONTINUE
10 CONTINUE
C
      DMIN=MIN(ABS(B(5,5)),ABS(B(6,6)),ABS(B(7,7)),ABS(B(8,8)),
      .
      ABS(B(9,9)))
      IF(DMIN*RC .LT. DTOL) GO TO 23
C
11 DO 13 I=9,1,-1
      T=0
      IF(I .NE. 9) THEN
            IP1=I+1

```

```

                DO 12 J=IP1,9
                    T=T+B(J,I)*A(J,K)
12      CONTINUE
        ENDIF
        A(I,K)=(B(10,I)-T)/B(I,I)
13 CONTINUE
C
        DO 14 I=1,4
            A(I,K)=A(I,K)*SFC
14 CONTINUE
        A(5,K)=A(5,K)*SFS
        A(6,K)=A(6,K)*SFS
        A(7,K)=A(7,K)*SFS
        A(8,K)=A(8,K)*SF
        A(9,K)=A(9,K)*SF
C
        LNEXT(K)=-LNEXT(K)
        DO 15 I=1,LNP
            NP=NPTS(I)
            LNEXT(NP)=-LNEXT(NP)
15 CONTINUE
16 CONTINUE
C
        XMIN=XMN
        YMIN=YMN
        DX=DDX
        DY=DDY
        RMAX=SQRT(RSMX)
        IER=0
        RETURN
C

```

```

21 IER=1
    RETURN
C
22 IER=2
    RETURN
C
23 XMIN=XMN
    YMIN=YMN
        DX=DDX
        DY=DDY
        IER=3
        RETURN

    END

C-----C
    SUBROUTINE STORE2(N,X,Y,NR,LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,DX,DY,
        IER)
    INTEGER N,NR,LCELL(NR,NR),LNEXT(N),IER,I,J,K,L,NN,NNR
    DOUBLE PRECISION X(N),Y(N),XMIN,YMIN,DX,DY,DELX,DELY,XMN,
        XMN,YMN,YMX
C
    NN=N
    NNR=NR
    IF(NN .LT. 2 .OR. NNR .LT. 1) GO TO 5
C
    XMN=X(1)
    XMX=XMN
    YMN=Y(1)
    YMX=YMN
    DO 1 K=2,NN

```

```

      IF(X(K) .LT. XMN) XMN=X(K)
      IF(X(K) .GT. XMX) XMX=X(K)
      IF(Y(K) .LT. YMN) YMN=Y(K)
      IF(Y(K) .GT. YMX) YMX=Y(K)
1  CONTINUE
      XMIN=XMN
      YMIN=YMN
C
      DELX=(XMX-XMN)/DBLE(NNR)
      DELY=(YMX-YMN)/DBLE(NNR)
      DX=DELX
      DY=DELY
      IF(DELX .EQ. 0. .OR. DELY .EQ. 0.) GO TO 6
C
      DO 3 J=1,NNR
        DO 2 I=1,NNR
          LCELL(I,J)=0
2  CONTINUE
3  CONTINUE
C
      DO 4 K=NN,1,-1
        I=INT((X(K)-XMN)/DELX)+1
        IF(I .GT. NNR) I=NNR
        J=INT((Y(K)-YMN)/DELY)+1
        IF(J .GT. NNR) J=NNR
        L=LCELL(I,J)
        LNEXT(K)=L
        IF(L .EQ. 0) LNEXT(K)=K
        LCELL(I,J)=K
4  CONTINUE
C

```

```

        IER=0
        RETURN
C
5 IER=1
    RETURN
C
6   IER=2
    RETURN
    END
C-----C
    SUBROUTINE
GETNP2(PX,PY,X,Y,NR,LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,DX,DY,NP,DSQ)
    INTEGER NR,LCELL(NR,NR),LNEXT(*),NP,I,I0,I1,I2,IMAX,IMIN,J,J0,J1,
    , J2,JMAX,JMIN,L,LMIN,LN
    DOUBLE PRECISION PX,PY,X(*),Y(*),XMIN,YMIN,DX,DY,DSQ,DELX,
    , DELY,R,RSMIN,RSQ,XP,YP
    LOGICAL FIRST
C
    XP=PX
    YP=PY
C
    IF(NR .LT. 1 .OR. DX .LT. 0. .OR. DY .LT. 0.) GO TO 9
C
    FIRST=.TRUE.
    IMIN=1
    IMAX=NR
    JMIN=1
    JMAX=NR
    DELX=XP-XMIN
    DELY=YP-YMIN
    I0=INT(DELX/DX)+1

```

```

      IF(I0 .LT. 1) I0=1
      IF(I0 .GT. NR) I0=NR
      J0=INT(DELY/DY)+1
      IF(J0 .LT. 1) J0=1
      IF(J0 .GT. NR) J0=NR
      I1=I0
      I2=I0
      J1=J0
      J2=J0
C
1   DO 6 J=J1,J2
      IF(J .GT. JMAX) GO TO 7
      IF(J .LT. JMIN) GO TO 6
      DO 5 I=I1,I2
          IF(I .GT. IMAX) GO TO 6
          IF(I .LT. IMIN) GO TO 5
          IF(J .NE. J1 .AND. J .NE. J2 .AND. I .NE. I1 .AND. I .NE. I1
          .AND. I .NE. I2) GO TO 5
C
          L=LCELL(I,J)
          IF(L .EQ. 0) GO TO 5
C
2   LN=LNEXT(L)
      IF(LN .LT. 0) GO TO 4
C
          RSQ=(X(L)-XP)**2+(Y(L)-YP)**2
          IF(.NOT. FIRST) GO TO 3
C
          LMIN=L
          RSMIN=RSQ
          R=SQRT(RSMIN)

```



```

IMIN=INT((DELY-R)/DX)+1
IF(IMIN .LT. 1) IMIN=1
IMAX=INT((DELY+R)/DX)+1
IF(IMAX .GT. NR) IMAX=NR
JMIN=INT((DELY-R)/DY)+1
IF(JMIN .LT. 1) JMIN=1
JMAX=INT((DELY+R)/DY)+1
IF(JMAX .GT. NR) JMAX=NR
FIRST=.FALSE.
GO TO 4

```

C

```

3 IF(RSQ .GT. RSMIN) GO TO 4

```

C

```

LMIN=L
RSMIN=RSQ

```

C

```

4 IF(ABS(LN) .EQ. L) GO TO 5
L=ABS(LN)
GO TO 2

```

```

5 CONTINUE

```

```

6 CONTINUE

```

C

```

7 IF(I1 .LE. IMIN .AND. I2 .GE. IMAX .AND. J1 .LE. JMIN .AND.
. J2 .GE. JMAX) GO TO 8
I1=I1-1
I2=I2+1
J1=J1-1
J2=J2+1
GO TO 1

```

C

```

8 IF(FIRST) GO TO 9

```

```

NP=LMIN
DSQ=RSMIN
LNEXT(LMIN)=-LNEXT(LMIN)
RETURN

```

C

```

9 NP=0
DSQ=0
RETURN
END

```

C-----C

```

SUBROUTINE SETUP2(XK,YK,ZK,XI,YI,ZI,S1,S2,S3,R,ROW)
INTEGER I
DOUBLE PRECISION XK,YK,ZK,XI,YI,ZI,S1,S2,S3,R,ROW(10),D,DX,
DXSQ,W,W1,W2,W3,DY,DYSQ

```

C

```

DX=XI-XK
DY=YI-YK
DXSQ=DX*DX
DYSQ=DY*DY
D=SQRT(DXSQ+DYSQ)
IF(D .LT. 0. .OR. D .GE. R) GO TO 1
W=(R-D)/R/D
W1=S1*W
W2=S2*W
W3=S3*W
ROW(1)=DXSQ*DX*W3
ROW(2)=DXSQ*DY*W3
ROW(3)=DX*DYSQ*W3
ROW(4)=DYSQ*DY*W3
ROW(5)=DXSQ*W2
ROW(6)=DX*DY*W2

```

```

    ROW(7)=DYSQ*W2
    ROW(8)=DX*W1
    ROW(9)=DY*W1
    ROW(10)=(ZI-ZK)*W
    RETURN

```

C

```

1 DO 2 I=1,10
    ROW(I)=0
2 CONTINUE
    RETURN
    END

```

C-----C

```

    SUBROUTINE GIVENS(A,B,C,S)
    DOUBLE PRECISION A,B,C,S,AA,BB,R,U,V

```

C

```

    AA=A
    BB=B
    IF(ABS(AA) .LE. ABS(BB)) GO TO 1

```

C

```

    U=AA+AA
    V=BB/U
    R=SQRT(.25+V*V)*U
    C=AA/R
    S=V*(C+C)

```

C

```

    B=S
    A=R
    RETURN

```

C

```

1 IF(BB .EQ. 0.) GO TO 2
    U=BB+BB

```

```

      V=AA/U
C
      A=SQRT(.25+V*V)*U
      S=BB/A
      C=V*(S+S)
C
      B=1
      IF(C .NE. 0.) B=1./C
      RETURN
C
      2 C=1
      S=0
      RETURN
      END
C-----C
      SUBROUTINE ROTATE(N,C,S,X,Y)
      INTEGER N,I
      DOUBLE PRECISION C,S,X(N),Y(N),XI,YI
C
      DO 1 I=1,N
          XI=X(I)
          YI=Y(I)
          X(I)=C*XI+S*YI
      1 CONTINUE
      RETURN
      END
C-----C
      DOUBLE PRECISION FUNCTION CS2VAL(PX,PY,N,X,Y,F,NR,
      .
          LCELL,LNEXT,XMIN,YMIN,DX,DY,RMAX,RW,A)
      INTEGER N,NR,LCELL(NR,NR),LNEXT(N),I,IMAX,IMIN,J,JMAX,JMIN,K,KP
      DOUBLE PRECISION PX,PY,X(N),Y(N),F(N),XMIN,YMIN,DX,DY,RMAX,

```

RW(N),A(9,N),D,DELX,DELY,R,SW,SWC,W,XP,YP

C

XP = PX

YP = PY

IF (N .LT. 10 .OR. NR .LT. 1 .OR. DX .LE. 0. .OR.

. DY .LE. 0. .OR. RMAX .LT. 0.) RETURN

C

IMIN = INT((XP-XMIN-RMAX)/DX) + 1

IMAX = INT((XP-XMIN+RMAX)/DX) + 1

IF (IMIN .LT. 1) IMIN = 1

IF (IMAX .GT. NR) IMAX = NR

JMIN = INT((YP-YMIN-RMAX)/DY) + 1

JMAX = INT((YP-YMIN+RMAX)/DY) + 1

IF (JMIN .LT. 1) JMIN = 1

IF (JMAX .GT. NR) JMAX = NR

C

IF (IMIN .GT. IMAX .OR. JMIN .GT. JMAX) GO TO 6

C

SW = 0.

SWC = 0.

C

DO 4 J = JMIN,JMAX

DO 3 I = IMIN,IMAX

K = LCELL(I,J)

IF (K .EQ. 0) GO TO 3

C

I DELX = XP - X(K)

DELY = YP - Y(K)

D = SQRT(DELX\*DELX + DELY\*DELY)

R = RW(K)

IF (D .GE. R) GO TO 2

```

      IF (D .EQ. 0.) GO TO 5
      W = (1.0/D - 1.0/R)**3
      SW = SW + W
      SWC = SWC + W*( ( (A(1,K)*DELX+A(2,K)*DELY+
      .           A(5,K))*DELX + (A(3,K)*DELY+
      .           A(6,K))*DELY + A(8,K) )*DELX +
      .           ( (A(4,K)*DELY+A(7,K))*DELY +
      .           A(9,K) )*DELY + F(K) )
C
2    KP = K
      K = LNEXT(KP)
      IF (K .NE. KP) GO TO 1
3    CONTINUE
4    CONTINUE
C
      IF (SW .EQ. 0.) GO TO 6
      CS2VAL = SWC/SW
      RETURN
C
5    CS2VAL = F(K)
      RETURN
C
6    CS2VAL = 0.
      RETURN
      END
C-----C
      SUBROUTINE NRA(XM,EPS,XF,A,B,C,D,E,Z)
      DOUBLE PRECISION A,B,C,D,E,EPS,EPS1,F1,F1D,X,XF,XM,Z
      INTEGER I
C
      EPS1=EPS*0.1

```



```

      X=XM
C
DO 10 I=1,10000000000
      F1=A+B*DLOG(X*1000)+C*X-D*(X**(-2))+E*(X**2)-Z
      F1D=C+(B/X)+((2*D)*(X**(-3)))+((2*E)*X)
      XF=X-(F1/F1D)
      IF (ABS((X-XF)/XF) .LT. EPS1) RETURN
      X=XF
10 CONTINUE
C
      END
C-----C
      SUBROUTINE RN(XM,EPS,XF,A,B,C,D,E,H)
      DOUBLE PRECISION A,B,C,D,E,EPS,EPS2,H,F1,F1D,X,XF,XM
      INTEGER I
C
      EPS2=EPS*0.1
      X=XM
C
DO 10 I=1,10000000000
      F1=A+B*X+C*(X**2)-D/X+E*(X**3)-H/1000
      F1D=B+(2*C*X)+D/(X**2)+(3*E)*(X**2)
      XF=X-(F1/F1D)
      IF (ABS((X-XF)/XF) .LT. EPS2) RETURN
      X=XF
10 CONTINUE
C
      END
C-----C
      SUBROUTINE GIN(A,B,C)
      IMPLICIT NONE

```

```

DOUBLE PRECISION A(4),B(4,6),C(6)
INTEGER I
C
DO 10 I=1,6
    C(I)=A(1)*B(1,I)+A(2)*B(2,I)+A(3)*B(3,I)+A(4)*B(4,I)
10 CONTINUE
RETURN
C
END
C-----C
SUBROUTINE ENTH(A,B,C)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION A(6),B,C
C=(A(1)+A(3)*B+((A(4)/2)*(B**2))-A(5)/B+((A(6)/3)*(B**3)))*(10**3)
RETURN
END
C-----C
SUBROUTINE ENTR(A,B,C)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION A(6),B,C,T
C
T=B*1000
C=A(2)+A(3)*DLOG(T)+A(4)*B-((A(5)/2)/(B**2))+((A(6)/2)*(B**2))
RETURN
C
END
C-----C
SUBROUTINE CHECKT3Mf(EPS,DEL,KA2,Nth,P3,MBa,STAE,MBf,Ma,H2,
    LHV,Hf,T2,K3,H3,Mf,SYSK,L,G2,T3)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION A,B,DEL,DEL1,EPS,EPS3,F1,F2,FD,G2(6),G22(6),H2,

```

```

      H3,H32,Hf,KA2,K3,K32,L,L2,LHV,Ma,MBa,MBf,Mf,
      Mf2,Nth,P3,STAE(4,6),SYSK(4),SYSK2(4),T2,T3,Y1,Y2
      INTEGER I
C
      EPS3=EPS*0.01
      DEL1=DEL*100
C
      DO 10 I=1,1000000000
          Y1=K3/1000
C
      CALL SYSTASHL(STAE,LHV,Hf,Nth,T2,K3,L,SYSK)
          Mf=(L*Ma*MBf)/MBa
C
      CALL GIN(SYSK,STAE,G2)
      CALL ENTH(G2,Y1,H3)
C
      A=(KA2*P3)/(Ma+Mf)
      A=A*A
      F1=K3-A
C
      K32=K3+K3*DEL1
      Y2=K32/1000
      CALL SYSTASHL(STAE,LHV,Hf,Nth,T2,K32,L2,SYSK2)
          Mf2=(L2*Ma*MBf)/MBa
C
      CALL GIN(SYSK2,STAE,G22)
      CALL ENTH(G22,Y2,H32)
C
      B=(KA2*P3)/(Ma+Mf2)
      B=B*B
      F2=K32-B

```

C

FD=(F2-F1)/(K3\*DEL1)

T3=K3-(F1/FD)

C

IF (ABS((T3-K3)/T3) .LT. EPS3) RETURN

K3=T3

10 CONTINUE

C

END

C-----C

SUBROUTINE SYSTASHL(STAE,LHV,Hf,Nth,T2,K3,L,SYSK)

IMPLICIT NONE

DOUBLE PRECISION DH(4),H2(4),H3(4),Hf,K3,L,LHV,Nth,STAE(4,6),

SYSK(4),T2,Y2,Y3

INTEGER I

C

Y2=T2/1000

Y3=K3/1000

C

DO 10 I=1,4

H2(I)=STAE(I,1)+STAE(I,3)\*Y2+((STAE(I,4)/2)\*(Y2\*\*2))-STAE(I,5)/Y2+

((STAE(I,6)/3)\*(Y2\*\*3))

H2(I)=H2(I)\*(10\*\*3)

H3(I)=STAE(I,1)+STAE(I,3)\*Y3+((STAE(I,4)/2)\*(Y3\*\*2))-STAE(I,5)/Y3+

((STAE(I,6)/3)\*(Y3\*\*3))

H3(I)=H3(I)\*(10\*\*3)

DH(I)=H3(I)-H2(I)

10 CONTINUE

C

L=0.7748\*DH(1)+0.2059\*DH(2)+0.0003\*DH(3)+0.019\*DH(4)

L=L/(Hf-0.02\*LHV-Nth\*LHV-(H3(3)-1.5625\*H3(2)+1.125\*H3(4)))

C

$SYSK(1)=0.7748/(1+L)$

$SYSK(2)=(0.2059-1.5625*L)/(1+L)$

$SYSK(3)=(0.0003+L)/(1+L)$

$SYSK(4)=(0.019+1.125*L)/(1+L)$

C

RETURN

C

END

C-----C

SUBROUTINE SPLINE(N,X,Y,B,C,D)

INTEGER N

DOUBLE PRECISION X(N),Y(N),B(N),C(N),D(N)

C

INTEGER NM1,IB,I

DOUBLE PRECISION T

C

NM1=N-1

IF (N .LT. 2) RETURN

IF (N .LT. 3) GO TO 50

C

$D(1)=X(2)-X(1)$

$C(2)=(Y(2)-Y(1))/D(1)$

DO 10 I =2,NM1

$D(I)=X(I+1)-X(I)$

$B(I)=2.*(D(I-1)+D(I))$

$C(I+1)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)$

$C(I)=C(I+1)-C(I)$

10 CONTINUE

C

$B(1)=-D(1)$

$B(N) = -D(N-1)$

$C(1) = 0.$

$C(N) = 0.$

IF (N .EQ. 3) GO TO 15

$C(1) = C(3)/(X(4)-X(2)) - C(2)/(X(3)-X(1))$

$C(N) = C(N-1)/(X(N)-X(N-2)) - C(N-2)/(X(N-1)-X(N-3))$

$C(1) = C(1) * D(1) ** 2 / (X(4) - X(1))$

$C(N) = -C(N) * D(N-1) ** 2 / (X(N) - X(N-3))$

C

15 DO 20 I=2,N

$T = D(I-1)/B(I-1)$

$B(I) = B(I) - T * D(I-1)$

$C(I) = C(I) - T * C(I-1)$

20 CONTINUE

C

$C(N) = C(N)/B(N)$

DO 30 IB=1,NM1

$I = N - IB$

$C(I) = (C(I) - D(I) * C(I+1)) / B(I)$

30 CONTINUE

C

$B(N) = (Y(N) - Y(NM1)) / D(NM1) + D(NM1) * (C(NM1) + 2. * C(N))$

DO 40 I=1,NM1

$B(I) = (Y(I+1) - Y(I)) / D(I) - D(I) * (C(I+1) + 2. * C(I))$

$D(I) = (C(I+1) - C(I)) / D(I)$

$C(I) = 3. * C(I)$

40 CONTINUE

$C(N) = 3. * C(N)$

$D(N) = D(N-1)$

RETURN

C

50 B(1)=(Y(2)-Y(1))/(X(2)-X(1))

C(1)=0.

D(1)=0.

B(2)=B(1)

C(2)=0.

D(2)=0.

RETURN

END

C-----C

DOUBLE PRECISION FUNCTION SEVAL(N,U,X,Y,B,C,D)

INTEGER N,I,J,K

DOUBLE PRECISION U,X(N),Y(N),B(N),C(N),D(N)

C

DOUBLE PRECISION DX

DATA I/1/

IF (I .GE. N) I=1

IF (U .LT. X(I)) GO TO 10

IF (U .LE. X(I+1)) GO TO 30

C

10 I=1

J=N+1

20 K=(I+J)/2

IF (U .LT. X(K)) J=K

IF (U .GE. X(K)) I=K

IF (J .GT. I+1) GO TO 20

C

30 DX=U-X(I)

SEVAL=Y(I)+DX\*(B(I)+DX\*(C(I)+DX\*D(I)))

RETURN

END

C-----C



```

SUBROUTINE CONSTANTS(PX,K1,K2)
IMPLICIT NONE
INTEGER I
DOUBLE PRECISION CON1(7),CON2(7),K1,K2,PX,STR(7)
C
OPEN(10,FILE='STA8ERES.TXT')
DO 100 I=1,7
    READ(10,*) CON1(I),CON2(I),STR(I)
100 CONTINUE
CLOSE(10)
C
    IF(PX .EQ. STR(1)) THEN
        K1=CON1(1)
        K2=CON2(1)
        GO TO 1000
    ENDIF
C
    IF(PX .EQ. STR(2)) THEN
        K1=CON1(2)
        K2=CON2(2)
        GO TO 1000
    ENDIF
C
    IF(PX .EQ. STR(3)) THEN
        K1=CON1(3)
        K2=CON2(3)
        GO TO 1000
    ENDIF
C
    IF(PX .EQ. STR(4)) THEN
        K1=CON1(4)

```

K2=CON2(4)

GO TO 1000

ENDIF

C

IF(PX .EQ. STR(5)) THEN

K1=CON1(5)

K2=CON2(5)

GO TO 1000

ENDIF

C

IF(PX .EQ. STR(6)) THEN

K1=CON1(6)

K2=CON2(6)

GO TO 1000

ENDIF

C

IF(PX .EQ. STR(7)) THEN

K1=CON1(7)

K2=CON2(7)

GO TO 1000

ENDIF

C

1000 RETURN

END

C-----C

SUBROUTINE RESULTS(I,STR,PRC,PRT,NCOM,NTURB,Ma,Mf,Mk,L,

· SYSK,P1,P2,P3,P4,P5,T1,T2,T3,T4,T5,H1,H2,

· H3,H4,H5,S1,S2,S3,S4,S5,K1,K2)

IMPLICIT NONE

INTEGER I

DOUBLE PRECISION STR,PRC,PRT,NCOM,NTURB,Ma,Mf,Mk,L,SYSK(4),

P3,P4,P5,T1,T2,T3,T4,T5,H1,H2,H3,H4,H5,S1,S2,S3,  
P1,P2,S4,S5,K1,K2

C

```

WRITE(*,*) 'Final Results
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) ' Number Of Iterations      = ',I
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) ' Turbocharger RPM Ratio      = ',STR
WRITE(*,*) ' Compressor Pressure Ratio   = ',PRC
WRITE(*,*) ' Turbine Pressure Ratio      = ',PRT
WRITE(*,*) ' Compressor Efficiency        = ',NCOM
WRITE(*,*) ' Turbine Efficiency          = ',NTURB
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) ' Air Flow Rate                = ',Ma , ' Kg/s '
WRITE(*,*) ' Fuel Flow Rate              = ',Mf , ' Kg/s '
WRITE(*,*) ' Gas Flow Rate               = ',Mk , ' Kg/s '
WRITE(*,*) ' Fuel to Air Ratio            = ',L
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) ' Composition Of Gas (%)
WRITE(*,*) ' Nitrogen                    = ',SYSK(1)*100
WRITE(*,*) ' Oxygen                     = ',SYSK(2)*100
WRITE(*,*) ' Carbon Dioxide              = ',SYSK(3)*100
WRITE(*,*) ' Water (Vapor)               = ',SYSK(4)*100
WRITE(*,*) '
WRITE(*,*) ' Pressure 1                  = ',P1 , ' bar '
WRITE(*,*) ' Pressure 2                  = ',P2 , ' bar '
WRITE(*,*) ' Pressure 5                  = ',P5 , ' bar '
WRITE(*,*) ' Pressure 3                  = ',P3 , ' bar '
WRITE(*,*) ' Pressure 4                  = ',P4 , ' bar '
WRITE(*,*) '

```

WRITE(*,*) ' Temperature 1	=',T1 , ' K ' '
WRITE(*,*) ' Temperature 2	=',T2 , ' K ' '
WRITE(*,*) ' Temperature 5	=',T5 , ' K ' '
WRITE(*,*) ' Temperature 3	=',T3 , ' K ' '
WRITE(*,*) ' Temperature 4	=',T4 , ' K ' '
WRITE(*,*) '	' '
WRITE(*,*) ' Enthalpy 1	=',H1 , ' KJ/Kg ' '
WRITE(*,*) ' Enthalpy 2	=',H2 , ' KJ/Kg ' '
WRITE(*,*) ' Enthalpy 5	=',H5 , ' KJ/Kg ' '
WRITE(*,*) ' Enthalpy 3	=',H3 , ' KJ/Kg ' '
WRITE(*,*) ' Enthalpy 4	=',H4 , ' KJ/Kg ' '
WRITE(*,*) '	' '
WRITE(*,*) ' Entropy 1	=',S1 , ' KJ/KgK ' '
WRITE(*,*) ' Entropy 2	=',S2 , ' KJ/KgK ' '
WRITE(*,*) ' Entropy 5	=',S5 , ' KJ/KgK ' '
WRITE(*,*) ' Entropy 3	=',S3 , ' KJ/KgK ' '
WRITE(*,*) ' Entropy 4	=',S4 , ' KJ/KgK ' '
WRITE(*,*) '	' '
WRITE(*,*) 'Constants :	' '
WRITE(*,*) '	' '
WRITE(*,*) 'K1 = P3/P2	=',K1
WRITE(*,*) 'K2 = Mk*Sqrt(T3)/P3	=',K2
WRITE(*,*) '	' '
WRITE(*,*) 'Program Terminated	' '
WRITE(*,*) '	' '

C

OPEN(20,FILE='APOTELESMATA.TXT')	
WRITE(20,*) 'Final Results	' '
WRITE(20,*) '	' '
WRITE(20,*) '	' '
WRITE(20,*) ' Number Of Iterations	=',I

```

WRITE(20,*) '
WRITE(20,*) ' Turbocharger RPM Ratio      = ',STR
WRITE(20,*) ' Compressor Pressure Ratio    = ',PRC
WRITE(20,*) ' Turbine Pressure Ratio       = ',PRT
WRITE(20,*) ' Compressor Efficiency         = ',NCOM
WRITE(20,*) ' Turbine Efficiency           = ',NTURB
WRITE(20,*) '
WRITE(20,*) ' Air Flow Rate                 = ',Ma  , '   Kg/s '
WRITE(20,*) ' Fuel Flow Rate               = ',Mf  , '   Kg/s '
WRITE(20,*) ' Gas Flow Rate                = ',Mk  , '   Kg/s '
WRITE(20,*) ' Fuel to Air Ratio             = ',L
WRITE(20,*) '
WRITE(20,*) ' Composition Of Gas (%)
WRITE(20,*) ' Nitrogen                    = ',SYSK(1)*100
WRITE(20,*) ' Oxygen                     = ',SYSK(2)*100
WRITE(20,*) ' Carbon Dioxide              = ',SYSK(3)*100
WRITE(20,*) ' Water (Vapor)               = ',SYSK(4)*100
WRITE(20,*) '
WRITE(20,*) ' Pressure 1                  = ',P1  , '   bar '
WRITE(20,*) ' Pressure 2                  = ',P2  , '   bar '
WRITE(20,*) ' Pressure 5                  = ',P5  , '   bar '
WRITE(20,*) ' Pressure 3                  = ',P3  , '   bar '
WRITE(20,*) ' Pressure 4                  = ',P4  , '   bar '
WRITE(20,*) '
WRITE(20,*) ' Temperature 1                  = ',T1  , '   K   '
WRITE(20,*) ' Temperature 2                  = ',T2  , '   K   '
WRITE(20,*) ' Temperature 5                  = ',T5  , '   K   '
WRITE(20,*) ' Temperature 3                  = ',T3  , '   K   '
WRITE(20,*) ' Temperature 4                  = ',T4  , '   K   '
WRITE(20,*) '
WRITE(20,*) ' Enthalpy 1                    = ',H1  , '   KJ/Kg '

```

```

WRITE(20,*) ' Enthalpy 2           = ',H2  , '   KJ/Kg '
WRITE(20,*) ' Enthalpy 5           = ',H5  , '   KJ/Kg '
WRITE(20,*) ' Enthalpy 3           = ',H3  , '   KJ/Kg '
WRITE(20,*) ' Enthalpy 4           = ',H4  , '   KJ/Kg '
WRITE(20,*) '                       '
WRITE(20,*) ' Entropy 1             = ',S1  , '   KJ/KgK'
WRITE(20,*) ' Entropy 2             = ',S2  , '   KJ/KgK'
WRITE(20,*) ' Entropy 5             = ',S5  , '   KJ/KgK'
WRITE(20,*) ' Entropy 3             = ',S3  , '   KJ/KgK'
WRITE(20,*) ' Entropy 4             = ',S4  , '   KJ/KgK'
WRITE(20,*) '                       '
WRITE(20,*) 'Constants :           '
WRITE(20,*) '                       '
WRITE(20,*) 'K1 = P3/P2             = ',K1
WRITE(20,*) 'K2 = Mk*sqrt(T3)/P3    = ',K2
WRITE(20,*) '                       '
WRITE(20,*) 'Program Terminated   '
WRITE(20,*) '                       '
CLOSE(20)

```

C

RETURN

END

C-----C

**Σημείωση:** Η υπορουτίνα CSHEP2,CS2VAL, καθώς και οι υπορουτίνες που είναι απαραίτητες για την εκτέλεση αυτών STORE2, GETNP2, SETUP2, GIVENS και ROTATE προέρχονται από την ιστοσελίδα [www.netlib.org](http://www.netlib.org) και η υπορουτίνες SPLINE και SEVAL από την συλλογή υπορουτίνων του μαθήματος «Αριθμητική Ανάλυση», που διδάσκεται στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, υπό τον καθηγητή κ. Βαλουγεώργη Δημήτριο.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ**



# TABLES OF PROPERTY DATA

Table G.1 Variation of specific heat, enthalpy, absolute entropy, and Gibbs function with temperature at 1 bar for various substances in units of kJ/kmol or kJ/kmol·K<sup>1</sup>

1. At $T_{\text{ref}} = 298.15 \text{ K (25°C)}$ , $p_{\text{ref}} = 1 \text{ bar}$					
Substance	Formula	$\bar{c}_p^\circ$	$\bar{h}^\circ$	$\bar{s}^\circ$	$\bar{g}^\circ$
Carbon (graphite)	C(s)	8.53	0	5.740	-131.1
Sulfur (rhombic)	S(s)	22.77	0	32.058	-95.58
Nitrogen	N <sub>2</sub> (g)	28.49	0	191.610	-57128
Oxygen	O <sub>2</sub> (g)	28.92	0	205.146	-61164
Hydrogen	H <sub>2</sub> (g)	29.13	0	130.679	-38961
Carbon monoxide	CO(g)	28.54	-110528	197.638	-167457
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub> (g)	35.91	-393521	213.794	-457264
Water	H <sub>2</sub> O(g)	31.96	-241856	188.824	-298153
Water	H <sub>2</sub> O(l)	75.79	-285829	69.948	-306685
Methane	CH <sub>4</sub> (g)	35.06	-74872	186.251	-130303
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub> (g)	39.59	-296833	248.094	-371803
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S(g)	33.06	-20501	205.757	-81847
Ammonia	NH <sub>3</sub> (g)	35.59	-46111	192.451	-163491

2. For  $298.15 < T < T_{\text{ref}}$ ,  $p_{\text{ref}} = 1 \text{ bar}$ , with  $y = 10^{-4} T$

$$\bar{c}_p^\circ = a + by + cy^2 + dy^3 \quad (1)$$

$$\bar{h}^\circ = 10^4 \left[ H^\circ + ay + \frac{b}{2} y^2 + cy^3 + \frac{d}{4} y^4 \right] \quad (2)$$

$$\bar{s}^\circ = S^\circ - a \ln T + by - \frac{c}{2} y^2 + \frac{d}{3} y^3 \quad (3)$$

$$\bar{g}^\circ = \bar{h}^\circ - T\bar{s}^\circ \quad (4)$$

## Πίνακας Δ.1 – Ιδιότητες για διάφορες ουσίες

Substance	Formula	$H^*$	$S^*$	$a$	$b$	$c$	$d$
Carbon (graphite)	C(s)	-2.101	-6.540	0.109	38.940	-0.146	-17.385
Sulfur (rhombic)	S(s)	-5.242	-59.034	14.795	24.075	0.071	0
Nitrogen*	N <sub>2</sub> (g)	-9.982	16.303	30.418	2.544	-0.238	0
Oxygen	O <sub>2</sub> (g)	-9.389	35.116	29.154	6.477	-0.184	-1.017
Hydrogen	H <sub>2</sub> (g)	-7.823	-22.966	26.882	3.586	0.105	0
Carbon monoxide	CO(g)	-120.809	18.937	30.962	2.439	-0.280	0
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub> (g)	-413.886	-87.078	51.128	4.368	-1.469	0
Water	H <sub>2</sub> O(g)	-253.871	-11.750	34.376	7.841	-0.423	0
Water	H <sub>2</sub> O(l)	-289.932	-67.147	20.355	109.198	2.033	0
Methane	CH <sub>4</sub> (g)	-81.242	96.731	11.933	77.647	0.142	-18.414
Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub> (g)	-315.422	-43.725	49.936	4.766	-1.046	0
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S(g)	-32.887	1.142	34.911	10.686	-0.448	0
Ammonia	NH <sub>3</sub> (g)	-60.244	-29.402	37.321	18.661	-0.649	0

Πίνακας Δ.2 – Τιμές σταθερών για τις σχέσεις του Πίν. Δ.1 (1), (2), (3), (4)

## ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

Ο Γάστης Βασίλειος γεννήθηκε στις 20 Μαΐου 1980, στον Χολαργό Αττικής. Μεγάλωσε μέχρι τα 15 του στην περιοχή του Ιλίου Αττικής και από τότε μέχρι σήμερα κατοικεί στην περιοχή της Νέας Χαλκηδόνας.

Αποφοίτησε από το 1<sup>ο</sup> Λύκειο Νέας Φιλαδέλφειας το καλοκαίρι του 1998 και συμμετείχε στις Πανελλήνιες Εξετάσεις, όπου και πέτυχε την εισαγωγή του στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, Βόλος.

Το καλοκαίρι του 1999 και κατά το διάστημα Ιουλίου – Σεπτεμβρίου εργάστηκε ως ασκούμενος μηχανολόγος μηχανικός στο Μηχανοστάσιο Αγίου Ιωάννη – Ρέντη (Μ.Α.Ι.), όπου και ήρθε σε πρώτη ουσιαστική επαφή με το επάγγελμα του μηχανολόγου.

Κύρια χαρακτηριστικά που τον διέπουν είναι η επιμονή και η υπομονή. Μεγαλωμένος σε ένα άψογο οικογενειακό περιβάλλον, από νωρίς έδειξε την κλίση του προς τις μηχανές, τις κατασκευές και τα μαθηματικά. Ιδιαίτερη δε ήταν και είναι η αγάπη του προς τους σιδηροδρόμους. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες τον οδήγησαν να επιλέξει το επάγγελμα του μηχανολόγου, επιλογή που μέχρι σήμερα δεν τον απογοήτευσε.

Σήμερα, εν έτη 2003, ολοκλήρωσε τον κύκλο σπουδών της σχολής του και πρόκειται να συνεχίσει τις σπουδές του στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης.

Βασίλειος Π. Γάστης

Βόλος, 31 Ιουλίου 2003